



И. И. КРИВОНОСОВ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕКТРО-АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В РАДИОСХЕМАХ



МАССОВАЯ
РАДИО
Библиотека

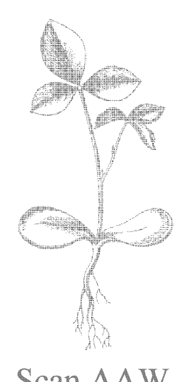
Выпуск 931

И. И. КРИВОНОСОВ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕКТРО-АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В РАДИОСХЕМАХ



МОСКВА
«ЭНЕРГИЯ»
1977



6Ф2.7
К82
УДК 621.396.6 : 534.86

Кривоносов И. И.

К 82 Полупроводниковые электроакустические преобразователи в радиосхемах. М., «Энергия», 1977.

88 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 931)

В книге рассматриваются свойства, характеристики и конструкции полупроводниковых электроакустических преобразователей. Даются рекомендации по изготовлению в радиолюбительских условиях звукоснимателей и микрофонов Приводятся схемы включения, методы улучшения характеристик, а также практические примеры построения полупроводниковых электроакустических преобразователей.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

$К \frac{30403\text{-}016}{051(01)\text{-}77}$ 187-76 6Ф2.7

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время на смену монофонической приходят стереофоническая аппаратура и аппаратура с объемным звучанием. Создание такой аппаратуры предполагает применение в радиолюбительской практике высококачественных электроакустических преобразователей.

Однако основные параметры и частотные характеристики выпускаемых в настоящее время радиоустройств, использующих электроакустические преобразователи, уже не удовлетворяют радиолюбителей, а технология изготовления высококачественных электромагнитных систем в промышленных и любительских условиях достаточно сложна.

В то же время в отечественной и зарубежной литературе появляются сообщения о возможностях использования и практическом применении полупроводниковых электроакустических преобразователей [1—3].

В качестве чувствительных элементов электроакустических преобразователей, кроме нитевидных полупроводниковых беспереходных элементов, за рубежом используются полупроводниковые диоды и транзисторы. Широкое применение нашли элементы типов MPS и «Pitran». При создании звукоснимателей, микрофонов, гидрофонов, измерителей давления, силы, массы, ускорения, механического напряжения и т. д. в качестве чувствительных элементов используются полупроводниковые приборы на основе *p-n*-переходов, барьера Шоттки, лавинных и туннельных диодов и канальных транзисторов.

Преимущества электроакустических преобразователей с полупроводниковыми чувствительными элементами по сравнению с приборами с использованием магнитных систем заключаются в их малых размерах, высокой чувствительности, улучшенных частотных свойствах, а также в простоте настроек и управления.

В книге рассматриваются свойства, характеристики, конструкции и схемы полупроводниковых электроакустических преобразователей, а также возможности их использования и методы улучшения характеристик.

Автор

Глава первая

УСТРОЙСТВО И ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1. Устройство и принцип действия электроакустических преобразователей

Электроакустический преобразователь является разновидностью электромеханического преобразователя — устройства, предназначенного для преобразования электрических колебаний в механические или механических в электрические [4]. Электромеханический преобразователь содержит электрическую цепь и механическую колебательную систему. К электрическим параметрам, характеризующим электромеханический преобразователь, относятся ток, напряжение, частота, к механическим — сила и колебательная скорость. Электрический колебательный процесс, протекающий в электрической цепи преобразователя, вызывает соответствующие колебания механической системы и наоборот.

Механическая колебательная система электроакустического преобразователя содержит диффузор и диафрагму или мембрану для излучения или приема звуковых колебаний. К числу таких преобразователей относятся электродинамические головки, микрофоны, телефоны, звукосниматели. Последние содержат вместо диафрагмы иглу, преобразующую механические колебания в усилие, воздействующее на электромеханический элемент преобразователя. Иногда это усилие передается через пластинку.

На рис. 1 показана структурная схема электроакустического преобразователя (звукоснимателя или микрофона). Звуковые колебания давления p (или механические колебания) воздействуют на воспринимающий элемент *1*. Выходной сигнал Q воспринимающего элемента *1*, деформируя электромеханический элемент *2*, вызывает изменение его электрического параметра $\Delta R(\Delta Z)$. Включение электромеханического элемента *2* в электрическую цепь *3* позволяет преобразовать изменение электрического параметра ΔR в выходной сигнал U.

На рис. 2 приведена упрощенная схема микрофона. Звуковые колебания давления p оказывают воздействие на диафрагму (мембрану) *1*. Диафрагма *1* преобразует давление p в силу Q, которая деформирует электромеханический элемент *2*, включенный в электрическую цепь *3*. Выходной сигнал в виде напряжения U или тока I является функцией давления p.

Выбор схем, узлов и элементов конструкций электроакустического преобразователя в большой степени определяется теми усло-

виями, в которых он должен работать, и теми характеристиками, которые желательно иметь. В частности, при конструировании микрофонов необходимо знать диапазон звуковых давлений, т. е. разность между статическим (атмосферным) давлением и давлением в данной точке звукового поля. Для звукоснимателей важно знать диапазон усилий от иглы, воздействующей на полупроводниковый элемент.

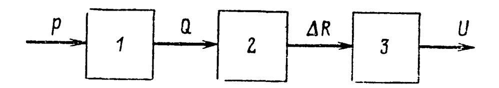


Рис. 1. Структурная схема полупроводникового электроакустического преобразователя.

При изготовлении преобразователя нас будут интересовать следующие параметры: чувствительность, характеризуемая отношением выходного сигнала к входному; диапазон частот; частотная характеристика чувствительности; неравномерность частотной характеристики чувствительности; коэффициент гармоник; динамический диапазон; частота собственных колебаний; уровень выходного сигнала; входное и выходное сопротивления и др.

Преобразовательные свойства электроакустических устройств зависят от механических, электромеханических и электрических свойств элементов и узлов преобразователей. При расчете преобразователя учитывают основные параметры диафрагмы: эффективную площадь, жесткость, диаметр, толщину, частоту собственных колебаний.

Полупроводниковые преобразовательные элементы, выполненные на основе материалов с высокими упругими свойствами, являются наиболее подходящими для изготовления электроакустических преобразователей, обладающих высокой чувствительностью и широким диапазоном частот.

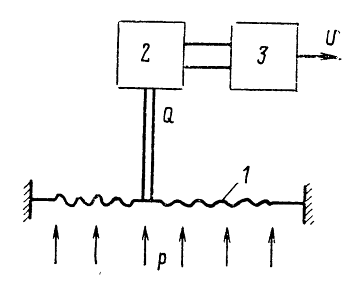


Рис. 2. Упрощенная схема электроакустического преобразователя давления — микрофона.

2. Материалы чувствительных элементов электроакустических преобразователей

До недавнего времени для преобразования электроакустических колебаний широко использовались кварцевые пьезоэлементы. В настоящее время широкое распространение получили электромагнитные системы и преобразователи с использованием полупроводниковых элементов.

Использование полупроводников для измерения электроакустических колебаний основано на двух видах физических явлений, протекающих в полупроводниках. Первый вид явлений связан с процессом преобразования акустических колебаний в изменение объемного сопротивления полупроводникового чувствительного элемента. Ко второму виду относятся эффекты преобразования акустических колебаний в сильно неоднородной области полупроводника (*p-n*-переход).

Применение в электроакустических преобразователях в качестве чувствительных элементов полупроводниковых резисторов (первый вид физических явлений) с их значительно более высоким коэффициентом тензочувствительности (для кремниевых тензорезисторов в 50 раз выше, чем для проволочных) позволяет при том же уровне выходного сигнала либо снизить податливость подвижной системы преобразователя (в 50 раз), либо фиксировать более низкие давления.

Основным недостатком таких тензорезисторов является их более высокая температурная зависимость по сравнению с проволочными эквивалентами. Однако более важными сравнительными характеристиками являются отношения коэффициента тензочувствительности к температурным коэффициентам сопротивления и чувствительности. Под коэффициентом тензочувствительности при этом понимают отношение относительного изменения сопротивления полупроводникового элемента к его относительной деформации.

Для повышения точности работы электроакустических преобразователей не следует допускать электрического разогрева полупроводниковых чувствительных элементов, если иметь в виду, что мощность, рассеиваемая на тензоэлементах, не должна превышать 0,01—0,02 Вт. Наибольшая стабильность работы полупроводниковых тензорезисторов наблюдается при протекании через них тока около 10 мА. При хорошем теплоотводе допускается увеличение тока до 20—25 мА.

Повышенная тензочувствительность полупроводниковых тензоэлементов позволяет улучшить частотные характеристики преобразователя в целом за счет повышения жесткости механической системы преобразователя.

Кроме кремния, для изготовления полупроводниковых тензорезисторов используется германий, который более технологичен, но обладает худшими тензочувствительными и температурными характеристиками

Одним из перспективных материалов для изготовления чувствительных элементов электроакустических преобразователей является карбид кремния. Он тверд и прочен, тугоплавок и жаростоек; плавится, разлагаясь на элементы, при 2800° С. Чрезвычайно устойчив к химическому воздействию: на воздухе заметно окисляется лишь при температуре 1300° С. В чистом виде карбид кремния — диэлектрик. Свойства полупроводника ему придают примеси. Вниманием к себе карбид кремния (карборунд) обязан уникальному сочетанию механической, термической и химической прочности с большой (2,86 эВ) шириной запрещенной зоны. Монокристаллический карбид кремния используется для изготовления высокотемпературных диодов и транзисторов. В некоторых кристаллах карбида кремния полупроводниковые свойства не только сохраняются, но даже улучшаются при температурах 500—700° С.

Из зерен карборунда изготовляют варисторы — нелинейные полупроводниковые резисторы, обладающие симметричной вольт-амперной характеристикой, которые также могут быть использованы в качестве тензоэлементов [5]. Тензоэлементы из карбида кремния обладают стабильностью физических характеристик до температур около 1200° С.

Коэффициент тензочувствительности элемента из полупроводникового материала *n*-типа убывает с ростом температуры по экспоненте, причем температурная зависимость коэффициента тензочувствительности в интервале температур от комнатной до +800° С остается постоянной при длительных циклах нагрева и охлаждения.

Обладая рядом преимуществ перед другими полупроводниковыми материалами, карбид кремния не находит пока такого широкого применения, как германий и кремний. Это объясняется трудностями выращивания монокристаллов необходимых размеров, а главное, введения контролируемых добавок. Отсюда следует трудность получения серии тензорезисторов с идентичными температурными характеристиками, выполненных на основе карбида кремния.

Органические полупроводники — перспективное направление поиска новых материалов, пригодных для использования в полупроводниковой электронике и полупроводниковых электроакустических преобразователях. Они вызывают интерес, во-первых, потому, что являются молекулярными кристаллами (в этом их существенное отличие от неорганических полупроводников), и, во-вторых, от них следует ожидать широкого разнообразия свойств, так как их молекулярные структуры очень разнообразны.

Получение монокристаллов органических полупроводников, молекулы которых сравнительно велики, пока затруднено. Эти соединения получают в виде порошка, содержащего мелкие кристаллы. Поэтому в настоящее время исследовать и использовать электрофизические свойства органических полупроводников можно, изготовляя образцы из спрессованных порошков или пленки.

Исследования показали, что образцы из органических полупроводников более сжимаемы, чем другие виды кристаллов, вследствие слабости межмолекулярных сил [6]. Предполагают, что, когда вещество в сжатом состоянии под большим давлением, молекулы его сближены, и это приводит к большому перекрыванию молекулярных орбит. С этой точки зрения представляет интерес зависимость удельного электрического сопротивления от давления. Исследования показали, что имеются области давлений, где изменения удельного электрического сопротивления, вызванные изменением давления, вполне обратимы.

Использование образцов из спрессованных порошков дает возможность предположить, что электрические свойства и в первую очередь электропроводность и энергия активации проводимости в значительной степени зависят от поверхностных свойств материала и от плотности упаковки частиц, т. е. от контакта между ними.

Влияние контакта между частицами отчетливо подтверждается зависимостью электропроводности от давления. Электропроводность возрастает с увеличением давления. Иногда эта зависимость сохраняется [6] до давлений в несколько сотен мегапаскалей. Давление оказывает влияние не только на проводимость, но и на энергию активации. Таким образом, значительные электрофизические изменения, происходящие в образцах из органических полупроводников при механическом воздействии, дают возможность использовать их

в качестве тензодатчиков и вести исследования их свойств методами, характерными для тензометрии.

Использование образцов из органических полупроводников дает возможность получить тензоэлементы с требуемыми тензометрическими и температурными характеристиками. Предпосылкой этому является широкий диапазон указанных параметров у исследованных образцов.

Большой интерес представляют исследования тензометрических и температурных свойств полупроводниковых полимеров с сопряженными кратными связями, обладающих особой физико-химической природой электропроводности.

Интересны также исследования электромеханических свойств особого класса химических веществ, так называемых полуметаллов. Известно [6, 7], что у некоторых образцов этих веществ температурный коэффициент сопротивления близок к нулю. При наличии высокой тензочувствительности указанное выше обстоятельство позволяет успешно решить задачу температурной самокомпенсации тензоэлементов.

Несомненным преимуществом тензоэлементов из органических полупроводников является простота получения образцов нужных размеров, форм и сопротивлений. В процессе изготовления можно путем изменения режимов прессования или термообработки контролировать их свойства с целью получения тензоэлементов с идентичными характеристиками. При этом важным обстоятельством является то, что изменение содержания примесей (даже на несколько процентов) не изменяет существенным образом электропроводность тензоэлементов.

Перспективность органических полимерных полупроводниковых тензоэлементов повышается ввиду практического отсутствия влияния на них радиации [7].

Недостатком указанных тензоэлементов в настоящее время является трудность их получения в виде тонких, нехрупких и прочных пластин для использования в широком диапазоне рабочих деформаций.

В последнее время все больше внимания уделяется разработке таких электроакустических преобразователей, которые позволили бы еще более повысить чувствительность и уровень выходного сигнала и одновременно обеспечивали бы возможность настройки и регулировки параметров преобразователя. Разработка таких электроакустических преобразователей ведется в основном по пути использования чувствительных элементов, выполненных на основе полупроводниковых материалов с *p*-*n*-переходами. При этом исследуется влияние механических воздействий на изменение основных параметров полупроводниковых *p*-*n*-переходов.

Подобные преобразователи позволяют расширить возможности компенсации дополнительных возбуждающих воздействий и допускают использование любых схем с полупроводниковыми элементами.

Исследование физических основ работы полупроводниковых элементов с *p*-*n*-переходами, их структур и конструктивных решений позволило разработать на их основе ряд новых электроакустических преобразователей.

Механические воздействия создаются здесь либо за счет усилия, приложенного к *p*-*n*-переходу с помощью иглы из твердого материала (алмаз, корунд), либо за счет давления, передаваемого через мембрану и шток на переход эмиттер — база. Установлено, что при

приложении силы, равной всего нескольким граммам, прямое или обратное сопротивление *p-n*-перехода, а следовательно, и напряжение на нем изменяются на несколько порядков. Под действием силы, приложенной к переходу эмиттер — база, изменяется также коэффициент усиления транзистора по току. Он уменьшается с увеличением нагрузки.

При исследовании влияния больших анизотропных деформаций на свойства кремниевых *p-n*-переходов было установлено, что с ростом деформации увеличивается ток и падает фото-э. д. с. Фототок слабо уменьшается с ростом нагрузки. Обратимость результатов у диодов с поверхностным слоем, не нарушенным механической обработкой, сохраняется вплоть до воздействия силы 90—100 г.

В новом полупроводниковом приборе — пьезочувствительном транзисторе (питране), который представляет собой кремниевый полупроводниковый триод типа *n-p-n*, имеется специальная диафрагма, механически связанная с *p-n*-переходом эмиттер — база. К диафрагме прикладывается сила, вызывающая изменение характеристик транзистора. При этом можно на несколько порядков изменить его выходную емкость и ряд других параметров [8].

В США и Японии тензочувствительные *p-n*-переходы с успехом используются в качестве датчиков и реле давлений, акселерометров, измерителей скоростей потока, микрофонов, бесконтактных индикаторов объема, измерителей нагрузок и т. д.

Анализ характеристик выпускаемых за рубежом тензочувствительных элементов с использованием полупроводниковых приборов с *p-n*-переходами дает возможность сделать вывод о разнообразии их свойств и высокой чувствительности. Даже при использовании диафрагм малых размеров давление в несколько десятков паскалей вызывает изменение сопротивления *p-n*-перехода на несколько порядков. Это обстоятельство позволяет решать вопрос фиксации малых давлений, а также повысить собственную частоту колебаний подвижной системы электроакустического преобразователя, что в свою очередь повышает температурную стабильность механической системы преобразователя за счет использования калибровочной пружины, обладающей повышенной жесткостью.

Заслуживает внимания исследование туннельного *p-n*-перехода, предназначенного для работы в качестве чувствительного к механическим деформациям элемента. Результатом таких исследований явилось создание чувствительного микрофона.

Были также проведены исследования влияния анизотропных деформаций на полевые транзисторы. Существенная особенность полевых транзисторов состоит в том, что благодаря высокому входному сопротивлению они по своим свойствам являются наиболее близкими (из всех известных в настоящее время полупроводниковых приборов) к электронным лампам. Статические характеристики полевых транзисторов довольно близки к характеристикам электровакуумных пентодов. Поэтому определять их основные статические параметры и приближенно рассчитывать низкочастотные каскады, выполненные с применением полевых транзисторов, можно графическим путем, руководствуясь методикой расчета ламповых схем.

Входное сопротивление большинства полевых транзисторов, выполненных на основе *p-n*-затвора, составляет (для постоянного тока) 10—15 МОм. Зная входное сопротивление и усилительные свойства транзистора, можно найти его коэффициент усиления по мощности, который в схеме с общим истоком на низкой частоте со-

ставляет примерно 1000. У транзисторов с изолированным затвором из-за более высокого входного сопротивления усиление по мощности оказывается выше.

При изменении температуры окружающей среды параметры полевых транзисторов меняются. Температурный диапазон, в котором могут использоваться полевые транзисторы, зависит от материала полупроводника, на основе которого изготовлен транзистор. В частности, для кремниевых транзисторов этот диапазон составляет — 60÷120° С, для германиевых —60÷+70° С.

Использование полевого транзистора в качестве тензоэлемента (тензотранзистора) позволяет производить подгонку, корректировку, а также управление его характеристикой по цепи управляющего электрода. Возможность использования полевого транзистора в качестве тензодатчика обусловлена тем, что один из основных его параметров — крутизна S вольт-амперной характеристики — имеет линейную зависимость от толщины d канала, занимаемого объемным зарядом [9]. В связи с этим изменение толщины канала на величину Δd, вызванное деформацией, приводит к изменению крутизны характеристики на величину ΔS. Подгонка вольт-амперной характеристики близко к заданной, а также ее корректировка и управление могут быть осуществлены по цепи затвора. Кроме того, полевой транзистор сам является токостабилизирующим элементом, что устраняет дополнительные погрешности, связанные с нестабильностью питающего тока

В качестве датчика механического напряжения может использоваться тонкопленочный полевой транзистор [9]. Под влиянием статического или динамического изгиба, сжатия или растяжения возникает канальная проводимость, что вызывает изменение тока исток — сток.

В качестве чувствительных элементов давлений могут быть использованы полупроводниковые приборы, имеющие многослойную структуру, такие, как тиристоры и триаки, а также туннельные диоды. Подобные приборы удобно использовать для получения релейной зависимости выходного электрического сигнала от давления.

На вольт-амперных характеристиках тиристоров, как и туннельных диодов, имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением При этом туннельные диоды имеют максимум по току, а тиристоры — по напряжению, что обусловливает их разное схемное включение.

Тиристоры имеют расширенный диапазон рабочих напряжений и токов Рабочие режимы туннельных диодов определяются напряжениями, составляющими доли вольта, и токами, составляющими единицы миллиампер. В то же время четырехслойные переключающие структуры могут иметь напряжение переключения 100—200 и даже 1000 В. Кроме того, четырехслойные приборы работают при токах от нескольких миллиампер до сотен ампер и выше. Мощность на выходе устройств с тиристорами достигает десятков киловатт.

Указанные выше свойства четырехслойных структур дают возможность в ряде случаев включать исполнительные органы систем регулирования и управления непосредственно в регистрирующие цепи, что затруднительно при использовании в качестве чувствительных элементов электроакустических преобразователей других типов. Преимущества тиристоров особенно важны в случае применения устройств индикации, так как многие выпускаемые в настоящее

время индикаторы имеют высокие рабочие напряжения (цифровые индикаторы, лампы с холодным катодом и т. д.).

Одним из основных требований к электроакустическим преобразователям является их малая критичность к колебаниям температуры окружающей среды. В определенных режимах четырехслойные структуры мало изменяют свои параметры с изменением температуры среды. Кроме того, уход параметров тиристора может быть скомпенсирован соответствующими термокомпенсирующими цепочками.

Особый интерес представляет также использование в качестве тензочувствительных элементов пятислойных симметричных структур — триаков (симмисторов). Характерной особенностью таких полупроводниковых приборов является наличие симметричной относительно начала координат вольт-амперной характеристики. Это позволяет использовать такие тензочувствительные элементы в цепях переменного тока при сравнительно простом построении их схем.

3. Электроакустические преобразующие элементы и их свойства

Для использования полупроводниковых элементов в качестве электроакустических преобразователей они должны обладать свойствами упругости.

Любое тело под действием приложенных к нему сил испытывает более или менее значительную деформацию. Деформацией называют смещение частиц тела друг относительно друга, а также изменение среднего расстояния между частицами. Важнейшими видами деформации являются всесторонние сжатие и растяжение, продольные сжатие и растяжение, поперечный и продольный изгибы. Все эти деформации можно свести всего к двум основным видам — продольному растяжению и сжатию, осуществляемым одновременно в разных направлениях. Изгиб сводится к растяжению волокон выпуклой и к сжатию волокон вогнутой поверхностей стержня. Сдвиг сводится к одновременному сжатию и растяжению в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Если по устранении внешних сил деформация исчезает, такое тело называют упругим; если же остается заметная остаточная деформация, тело называют пластичным.

В твердых телах силы, возникающие при деформации и стремящиеся вернуть смещенные частицы тела в их положение равновесия, имеют электрическое происхождение. Вместе с тем тепловое движение оказывает решающее влияние на упругость твердых тел. Таким образом, упругие свойства тел определяются взаимосвязью механических, электрических и тепловых явлений.

В математической теории упругости принято упрощенное понятие упругости и закона Гука. Отвлекаясь от молекулярного строения тел и природы упругих сил и пренебрегая влиянием теплового движения, считают, что небольшие деформации пропорциональны напряжению. В кристаллофизике явления упругости трактуются как результат электрических взаимодействий частиц, расположенных в узлах кристаллической решетки. Применение законов электрического взаимодействия частиц в кристаллах позволило рассчитать силы упругости и выявить их зависимость от строения кристалла и электрополярных свойств частиц. Электрическая теория сил в кристалле вскрыла связь между упругостью твердых тел и кристаллообразую-

щими процессами. А это привело к раскрытию зависимости механических свойств от химического строения тел.

На основе теплового движения частиц получила развитие термодинамическая теория упругости твердых тел. Кроме того, было доказано, что механические свойства кристалла в высокой степени зависят от тех неупругих (пластических, необратимых) деформаций, которым когда-либо ранее подвергался кристалл. Механические колебания, вызывающие периодические уплотнения или сдвиги среды, порождают распространение упругих колебаний среды. Затухание упругих колебаний в среде вследствие внутреннего трения приводит к преобразованию энергии деформации в энергию молекулярно-теплового движения. Процессы, в которых затрачивается работа на деформацию и на трение, являются главными компонентами преобразования механического движения в молекулярно-тепловое.

Относительную деформацию ε оценивают отношением изменения размера тела Δl к первоначальному размеру l:

$$\varepsilon = \Delta l / l.$$

Интенсивность упругих сил характеризуется силой, действующей на единицу площади поперечного сечения, взятого в направлении, нормальном (перпендикулярном) или касательном к действующим силам. Эту силу называют соответственно нормальным или касательным напряжением деформированного тела

$$\sigma = Q/s,$$

где σ — напряжение деформированного тела; Q — сила; s — площадь поперечного сечения.

Закон Гука показывает, что напряжение деформированного тела пропорционально относительной деформации

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Коэффициент E называется модулем упругости.

Закон Гука справедлив только до известных пределов, при которых нарушается пропорциональная зависимость между напряжением и деформацией. Это напряжение называют пределом пропорциональности $\sigma_{пр}$. При несколько большем напряжении, называемом пределом упругости $\sigma_{уп}$, тело теряет свои упругие свойства; при устранении внешних сил форма тела восстанавливается не полностью, остается остаточная деформация.

Многие твердые тела состоят из отдельных очень мелких кристаллов («зерен»), иногда отделенных друг от друга веществом иного состава. Эти кристаллы расположены в беспорядке, и механические характеристики, получаемые в результате испытаний, представляют собой не что иное, как видоизмененные влиянием прослоек средние значения для отдельных кристаллов, расположенных по различным направлениям. Поэтому, чтобы уяснить себе особенности поликристаллических материалов, важно изучить механические свойства монокристаллов.

Монокристаллы анизотропны: механические свойства монокристаллов зависят от направления действия нагрузки по отношению к кристаллографическим осям. При растяжении монокристалла после критической точки начинается пластическая деформация, т. е. скольжение отдельных слоев кристалла относительно друг друга по опре-

деленным плоскостям. Деформации мелких кристаллов, из которых составлен металлический образец, имеют такой же характер. Когда напряжение достигает предела упругости, начинаются скольжения в некоторых наиболее неблагоприятно расположенных микрокристаллах.

К кристаллическим телам относятся металлические проводники, большинство полупроводниковых и магнитных материалов, а также многие неорганические и ряд органических диэлектриков.

Одним из факторов, обусловливающих главнейшие свойства материалов, является их строение — вид химической связи, агрегатное состояние, структура, энергия взаимодействия элементарных частиц и т. д.

В таких полупроводниках, как германий Ge, кремний Si, арсенид галлия GaAs и др., имеют место гомеополярные или ковалентные связи.

Гомеополярные силы обеспечивают наиболее прочную связь атомов в единой кристаллической решетке. Такие кристаллы отличаются большой твердостью и высокой температурой плавления. Интересным примером гомеополярной связи является алмаз, где осуществляется связь каждого атома с четырьмя соседними.

Рассмотрим, чем отличается идеальный кристалл от реального. В реальных кристаллах существуют все типы связей. Кроме того, для реальных кристаллов характерны различные отклонения от строгой периодичности построения кристаллической решетки. Иначе говоря, в кристаллических решетках реальных кристаллов существуют искажения, вызванные рядом факторов: тепловым движением, наличием примесей, механическими напряжениями и т. д. Искажения периодичности решетки оказывают большое, а подчас даже и решающее влияние на физические свойства кристаллов. Поэтому очень важно знать условия возникновения искажений или, как говорят физики, дефектов кристаллической решетки.

С изменением температуры изменяются тепловое движение атомов и степень нарушения периодичности решетки. Тепловые нарушения правильности строения решетки существуют всегда, и они являются как бы фоном, на котором разыгрываются все явления, происходящие в кристаллах. Этим и объясняется тот факт, что практически все свойства кристаллов так или иначе зависят от температуры. Только при абсолютном нуле кристалл будет свободен от таких нарушений периодичности, и только при этих условиях возможно вполне равновесное состояние (если в кристалле нет каких-либо других нарушений структуры).

Дефекты решетки оказывают большое влияние на электрические свойства полупроводников, а также на оптические, термодинамические, механические, магнитные и иные свойства кристаллов.

Все кристаллические тела в той или иной степени «загрязнены». «Загрязнения» эти представляют собой атомы чужеродных элементов (примесей). Избавиться полностью от примесей невозможно, хотя современная наука имеет хорошо разработанные методы очистки полупроводниковых материалов. Самые сверхочищенные вещества, содержащие, например, один примесный атом на 10^{10} атомов основного вещества, по существу являются загрязненными, так как в 1 см^3 такого вещества содержится по крайней мере 10^{12} атомов примеси. Примеси играют колоссальную роль (во многих случаях положительную), определяя ряд важных свойств полупроводников. Это обстоятельство положено в основу технологической обработки ма-

териала, называемой легированием. Легирование заключается в том, что в материал сознательно вводят определенного рода примеси для придания ему нужных свойств.

Кроме свойства упругости, для использования в электроакустических преобразователях полупроводниковые тензорезистивные элементы должны обладать пьезорезистивным эффектом, заключающимся в изменении электрического сопротивления при приложении к элементу механического напряжения.

Влияние деформации на сопротивление элемента связано как с изменением удельной проводимости, так и с изменением длины и площади поперечного сечения образца. В металлах влияние обоих этих эффектов приблизительно одинаково. Однако для многих полупроводников изменение удельной проводимости является гораздо более существенным, чем изменение размеров образца. Пьезорезистивный эффект важен для создания приборов, предназначенных для измерения малых сил, смещений, деформаций, ускорений и т. д., так как у таких приборов тензометрический коэффициент приблизительно в 50 раз больше, чем у металлических датчиков. При использовании в динамическом режиме достаточно большие значения тензочувствительности делают полупроводниковые преобразователи сравнимыми с пьезоэлектрическими кристаллами и керамикой. Однако пьезорезистивные приборы обладают важным преимуществом, заключающимся в том, что их тензочувствительность не зависит от частоты. Поэтому подобно стандартным тензодатчикам такие устройства могут быть использованы для преобразования как статических, так и динамических нагрузок. Кроме того, размеры таких датчиков можно сделать весьма малыми. Таким образом, пьезорезистивные полупроводниковые тензодатчики имеют существенные преимущества, как по сравнению с пьезоэлектрическими преобразователями, так и с металлическими проволочными и фольговыми тензодатчиками.

В электроакустических преобразователях обычно используется либо простой продольный эффект полупроводниковых тензодатчиков, либо сдвиговый эффект, при котором измеряется компонента электрического поля, перпендикулярная направлению тока. Возможно использование также непосредственной реакции этих устройств на всестороннее давление.

После открытия пьезорезистивного эффекта в германии и кремнии были проведены аналогичные работы по изучению пьезорезистивных свойств других полупроводников.

Наибольшее распространение в измерительной технике получили тензорезисторы, выполненные на основе кремния, германия, арсенида галлия, антимонида алюминия, антимонида индия, антимонида галлия, селена, теллура, сплавов селена с кадмием, селена с теллуром, свинца с селеном, свинца с теллуром.

Тензорезисторы могут быть получены в виде моно- и поликристаллов. Наиболее распространенными формами тензорезисторов являются «усы», ленты, пленки, диафрагмы. При изготовлении тензорезисторов используется планарно-эпитаксиальная технология, выращивание из газовой фазы, напыление, прессование. Планарно-эпитаксиальная технология изготовления полупроводниковых приборов включает в себя следующие операции: резку слитков, шлифовку и полировку пластин, фотолитографию, диффузионные процессы, изготовление контактов, монтаж и сборку структур в корпус. Отечественные тензорезисторы типа кремнистор получены реакцией в газо-

вой фазе. Монокристаллические тензорезисторы, полученные таким путем, характеризуются совершенством структуры и механической прочностью. Из газовой фазы могут быть выращены и полупроводниковые ленты, например ленты кремния толщиной 0,1—15 мкм, шириной 0,1 мм и длиной 1—3 см. Известен способ получения монокристаллического карбида кремния осаждением из газовой фазы с помощью сублимации. Представляет интерес получение полупроводниковых тензорезисторов осаждением арсенида галлия на изолирующих подложках, выполненных из сапфира, шпинели (алюминат магния), а также окиси бериллия. Основное преимущество шпинели заключается в том, что ее структура более всего соответствует структурам арсенида галлия и кремния, что дает меньше дефектов в выращенном слое полупроводника. Методом напыления могут быть получены пленочные тензорезисторы как из неорганических, так и из органических полупроводниковых материалов. Монолитные поликристаллические тензорезисторы получают прессованием. Так, например, тензорезисторы из сернистого молибдена получают путем прессования порошка, активированного в воздухе при температуре 500° С, в цилиндрические таблетки высотой 10 и диаметром 8 мм. Сопротивление таблеток 3—4 кОм стабилизируется после двухмесячного старения.

Тензочувствительные *p-n*-переходы создают на основе германия, кремния, арсенида галлия и антимонида галлия, реже — из других полупроводников. На основе вышеперечисленных материалов созданы тензочувствительные элементы на базе обычных и туннельных диодов и транзисторов, полевых транзисторов, приборов с использованием эффекта Шоттки и Ганна, переключающих приборов типа динисторов, тиристоров и т. п.

Использование устройств на *p-n*-переходах в качестве электроакустических преобразователей основано на том, что вольт-амперные характеристики этих устройств изменяются при приложении механических напряжений или давлений. Это значит, что электрическое сопротивление данного устройства при определенном электрическом смещении является функцией приложенного механического напряжения. Изменение сопротивления может быть использовано как мера приложенного напряжения или давления.

Прямая и еще в большей степени обратная ветви вольт-амперной характеристики диода меняют свой вид при действии механического напряжения. Эксперименты показывают, что при изменении давления на несколько мегапаскалей сопротивление обратносмещенного *p-n*-перехода меняется на несколько порядков. При соответствующем конструктивном исполнении электроакустического преобразователя такое изменение сопротивления можно получить при весьма малом усилии (несколько десятков грамм).

Как для кремниевых, так и для германиевых диодов наблюдается возрастание тока с увеличением механического напряжения. В то же время у кремниевых туннельных диодов ток возрастает с увеличением давления, а у германиевых диодов он падает с повышением давления. Это различие связано с разными знаками коэффициентов, выражающих зависимость ширины запрещенной зоны этих материалов от давления. При использовании стабилитрона в качестве электроакустического преобразователя наиболее предпочтительным режимом его работы является смещение рабочей точки в область пробоя, что достигается за счет источника постоянного напряжения. Любое изменение вольт-амперной характеристики, возникающее под

Таблица 1

Элемент или соединение	Si	Ge	InSb	InAs	GaSb	InP	GaAs
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,09	0,66	0,17	0,33	0,7	1,27	1,43
Производная ширины запрещенной зоны по давлению, эВ/Па	—1,5	5	15,5	5,5	16	4,6	9,4

действием механического напряжения, вызывает в этом случае большое изменение тока, которое можно определить, например, путем измерения падения напряжения на последовательно включенном постоянном резисторе. Для температурной компенсации можно применить второй диод с температурным коэффициентом, имеющим обратный знак.

Механические напряжения в полупроводниковых элементах можно создать разными способами. Один из них связан с применением иглы, передающей усилие на полупроводник (локальное давление). В этом случае даже малые усилия вызывают значительные механические напряжения. Существует и прямой способ создания механических напряжений в полупроводнике, связанный с воздействием всестороннего давления. Такие исследования были проведены как на обычных, так и на туннельных *p-n*-переходах. Найдено, что вольт-амперная характеристика туннельного диода чувствительна как к воздействию локального, так и всестороннего давления. В табл. 1 приведены ширина запрещенной зоны для некоторых элементов и соединений при температуре 300 К и производная этой ширины по давлению.

Из табл. 1 следует, что, поскольку производная ширины запрещенной зоны по давлению для кремния отрицательна, туннельный ток в нем должен увеличиваться с повышением давления. Для всех остальных элементов, указанных в табл. 1, туннельный ток с повышением давления уменьшается, что подтверждено экспериментально [10].

При использовании транзисторов в качестве электроакустических преобразователей их основное преимущество по сравнению с диодами заключается в возможности усиливать ток и, следовательно, получать большую выходную мощность. С помощью цепи управления транзистора можно выбирать в качестве рабочего заданный участок вольт-амперной характеристики. В конечном счете указанные возможности транзистора позволяют повысить чувствительность и улучшить частотные характеристики электроакустического преобразователя.

В электроакустических преобразователях нашли применение различные типы полевых или канальных транзисторов (например, типа MOS или тонкопленочные), которые под влиянием изгиба, растяжения или сжатия меняют проводимость канала, что вызывает изменение тока исток — сток [9].

4. Основные механические узлы электроакустических преобразователей и их особенности

Для полупроводниковых электроакустических преобразователей характерно использование однотипных элементов.

Рассмотрим возможность изготовления радиолюбителем элементов и узлов электроакустических преобразователей на основе выпускаемых промышленностью радиодеталей. В качестве примера воспользуемся микрозвукоснимателем, выполненным на базе одного из серийных отечественных транзисторов, например типа МП40. Отделив крышку транзистора (рис. 3) от основания *1* корпуса, ленточку эмиттерного вывода отпаивают от эмиттера. Вместо нее к эмиттеру подпаивают спираль из медной проволоки диаметром 0,05 мм.

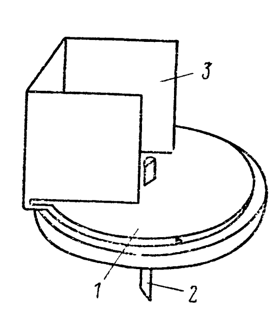


Рис. 3. Конструкция транзистора без крышки с латунной пластиной.

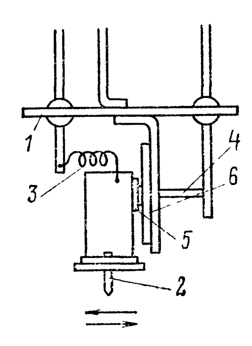


Рис. 4. Конструкция звукоснимателя на транзисторе.

Спираль должна иметь 3—4 витка, диаметр ее около 2 мм. Чтобы лишний раз не перегревать монокристалл транзистора, одновременно с концом спирали к эмиттеру следует припаять держатель корундовой иглы *2*. Предварительно его следует соответственно подготовить. Для этого латунную пластину *3* держателя нужно согнуть под углом 90°, а латунную полоску хвостика обрезать. После этого следует тщательно зачистить и облудить наружную боковую поверхность латунной щечки, а затем припаять ее к эмиттеру. На этом изготовление микрозвукоснимателя заканчивается. Вид звукоснимателя и элементы его конструкции показаны на рис. 4. Звукосниматель состоит из основания корпуса *1*, иглы *2*, медной спирали *3*, коллекторного вывода *4*, эмиттерного впая *5*, монокристалла *6*. В таком положении звукосниматель ставится на грампластинку (рабочие усилия прикладываются в направлениях, указанных стрелками).

Звукосниматель можно изготовить и другим способом. Для этого после удаления крышки корпуса коллекторный и эмиттерный выводы транзисторов слегка сгибают внутрь, с тем чтобы ослабить ленточки коллекторного и эмиттерного выводов. После этого хвостик латунного держателя корундовой иглы обрезают так же, как и в предыдущем случае, но никакого изгиба не производят. Затем

держатель тщательно обезжиривают (например, бензином) и приклеивают к стойке — базовому выводу, как указано на рис. 5. При этом следует проследить, чтобы верхний (тупой) конец иглы *2* и диск *1*, в котором она закреплена, по возможности плотно прижимались к стойке. Для повышения жесткости крепления иглы к стойке нужно дополнительно приклеить один из лепестков *3* клеем БФ-2. Сушить нужно при комнатной температуре во избежание порчи *р-п-* и *п-р*-переходов транзистора. Для лучшей прочности уже

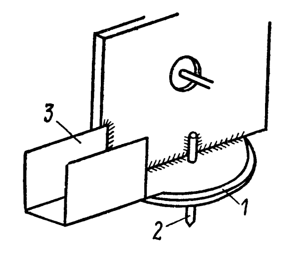


Рис. 5. Изготовление держателя в звукоснимателе.

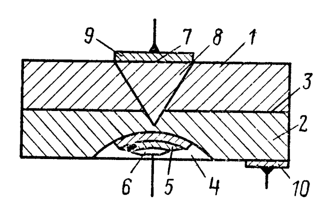


Рис. 6. Электроакустический канальный транзистор с изолированным затвором.

приклеенный и просушенный иглодержатель в местах склейки нужно еще несколько раз покрыть клеем, каждый раз высушивая его.

В обычных условиях микрозвукосниматель достаточно хорошо работает без дополнительной герметизации монокристалла. Однако если предполагается, что звукосниматель будет находиться в условиях повышенной влажности, то монокристалл (всю эмиттерную сторону, торцы и коллекторное отверстие стойки) можно покрыть тонким слоем какого-либо гидроизоляционного влагостойкого лака, например эмалью ЭКР-5 или лаком К-7.

Микрозвукосниматель хорошо работает даже при нагрузке на иглу, составляющей всего 3—4 г. Поэтому крепить его следует к легкому (или облегченному подвеской на пружине так, как это делается в современных пьезоэлектрических звукоснимателях) тонарму. Благодаря малой массе, приведенной к концу иглы, ее износ весьма мал, и практически отпадает необходимость менять иглу — она становится «вечной».

Удобная для использования в электроакустическом преобразователе конструкция канального транзистора описана в [11]. В этом транзисторе (рис. 6) усилие может быть приложено к сплавному контакту *р*-типа, выполненному в виде пирамиды. Электромеханический узел электроакустического преобразователя состоит из пластинки *1* полупроводника *р*-типа и диффузионного слоя *2* *п*-типа. Пластина *1* и слой *2* образуют *р-п*-переход *3*. Диффузионный слой *2* *п*-типа выполнен с углублением *4*. На поверхность углубления нанесены слой изолятора *5* и слой металла *6*. В пластине *1* выполнен сплавной контакт *7* *р*-типа, имеющий форму пирамиды с вершиной *8*. Вершина пирамиды находится против центра углубления *4*. Узел содержит омические контакты *9* и *10*, припаянные к пластине *1* и слою *2* соответственно.

5. Особенности конструктивного изготовления основных узлов электроакустических преобразователей

Одним из важнейших вопросов при изготовлении электроакустических преобразователей, определяющим их нормальную работу, является крепление чувствительного элемента к механическим узлам. Крепление тензочувствительного элемента производится различными способами. При этом необходимо учитывать требования к связующим веществам, так как характеристики электроакустического преобразователя в значительной степени меняются в зависимости от способа крепления и связующего материала. Одним из наиболее распространенных способов крепления является наклеивание тензочувствительного элемента. Однако после наклеивания тензоэлемента и затвердевания клея возникает постоянное механическое напряжение, вызывающее в свою очередь продольную относительную деформацию.

У приклеиваемых полупроводниковых тензоэлементов (по сравнению с неприклеиваемыми) затрачивается некоторое время на установление сигнала после приложения возмущающего воздействия на упругий элемент. Приклеиваемый тензоэлемент является инерционным элементом с постоянной времени, существенно зависящей от свойств клея и технологических факторов.

Когда тензоэлемент приклеивают, он изменяет свое начальное сопротивление даже при постоянной температуре за счет деформации, вызванной процессом полимеризации клея. Характер изменения зависит от типа применяемого клея. Клеи, твердеющие после испарения растворителей, влияют на изменение сопротивления незначительно (сопротивление изменяется приблизительно на 3 Ом при начальном сопротивлении 120 Ом). Эпоксидные и фенольные смолы, силиконовые клеи, твердеющие при комнатной или повышенной температурах, влияют на изменение сопротивления в большей степени (приблизительно на 7—15 Ом). Так как некоторые клеи твердеют только под давлением, то в подобных случаях сопротивление тензоэлемента после приклеивания зависит также и от приложенного давления. Если точка затвердевания клея лежит в области повышенных температур, на изменение сопротивления тензоэлемента влияют коэффициенты теплового линейного расширения подложки, клея и собственно тензодатчика.

Температурная зависимость сопротивления наклеенного тензочувствительного элемента определяется рядом факторов: изменением геометрических размеров тензочувствительного элемента (например, на основе кремния) вследствие линейного теплового расширения полупроводникового материала; влиянием температуры на подвижность и плотность носителей заряда в полупроводниковом материале; влиянием разницы коэффициентов линейного теплового расширения полупроводникового материала и материала объекта измерения; изменением коэффициента тензочувствительности K под влиянием температуры.

Для клеев характерно также явление, называемое ползучестью, которое проявляется в большей или меньшей степени в зависимости от типа и состава клея. Под ползучестью понимают изменяющиеся во времени процессы, протекающие в объекте измерения, клеевом слое и тензочувствительном элементе после приложения или снятия скачкообразного нагружения. Ползучесть клеевого слоя направлена всегда против действия нагрузки.

Поскольку все явления ползучести сильно зависят от температуры, точность измерения приклеенных тензоэлементов в значительной мере определяется ползучестью клеевого слоя и температурной зависимостью наклеенных тензоэлементов.

С целью улучшения передачи продольной деформации рекомендуется применять клеи с очень высокими температурами размягчения, так как выше температуры размягчения ползучесть полупроводниковых тензоэлементов увеличивается примерно в 100 раз при удвоении перепада температур. Толщина клеевого слоя должна быть по возможности меньше. При уменьшении толщины слоя в 100 раз ползучесть снижается примерно в 30 раз. Этого можно достичь, если вовсе исключить изоляционный слой между деформируемым элементом и тензоэлементом или обеспечить малую упругость этого слоя.

Изоляционные слои с хорошими механическими свойствами получаются за счет распыления тонких керамических или металлоокисных покрытий. Места контактов из-за действия деформации на границе перехода полупроводник — связующее должны быть удалены от концов тензоэлемента минимум на 1 мм.

Следует помнить, что срок хранения всех клеев, как правило, не превышает полугода.

С целью качественного крепления тензоэлементов необходимо тщательно подготовить склеиваемые поверхности. Поверхность должна быть не слишком гладкой, совершенно чистой и обезжиренной. Остатки краски или аналогичных покрытий необходимо полностью удалить. Гладкие или полированные поверхности следует зачищать мелкозернистой наждачной бумагой в различных направлениях. Затем чистой тряпкой или ватным тампоном поверхность склеивания и ее непосредственное окружение протирают ацетоном или четыреххлористым углеродом до тех пор, пока на тряпке или ватном тампоне не будет следов загрязнения. Наклеиваемый тензоэлемент должен быть безупречно чистым. Не следует касаться его руками, все операции с тензоэлементами, а также с возможными бумажными прокладками производят только чистым пинцетом. Набор необходимых инструментов, а также флаконы с различными клеями должны быть приготовлены заранее.

В случае использования незащищенного полупроводникового тензоэлемента его наклеивание производят следующим образом. На предварительно обработанную поверхность при помощи чистой кисточки или штапеля наносят тонкий слой клея. Полупроводниковые тензоэлементы можно приклеивать любым из применяемых для этой цели клеев, например клеем БФ-2. Во избежание контактирования полупроводникового тензоэлемента с поверхностью приклеивания на клей накладывают и слегка прижимают вырезанную соответствующим образом бумажную прокладку. Толщина бумаги должна быть как можно меньшей и в любом случае не должна превышать 40 мкм. Можно применять также тонкий слой стеклоткани, что особенно целесообразно при повышенных температурах. Бумага не должна быть слишком гладкой (лощеной) и плотной. Желательно, чтобы она была как можно более пористой и гигроскопичной. На бумагу пинцетом накладывают полупроводниковый тензоэлемент и слегка прижимают его тампоном. Затем на тензоэлемент наносят и слегка размазывают еще одну каплю клея, после чего накладывают второй слой бумаги. При этом необходимо следить, чтобы тензоэлемент сохранял свое положение.

В случае использования клеев горячего отверждения и содержащих растворители, например в случае фенопласта, необходима примерно получасовая выдержка. Затем все покрывают сверху разделительной пленкой. Эпоксидные смолы и клеи холодного отверждения, застывающие в течение короткого времени, должны покрываться пленкой сразу же, с тем, чтобы до затвердевания можно было плотно прижать друг к другу элементы, а все слои клея между объектом регистрации и тензоэлементом были достаточно тонкими. В качестве разделительной пленки при температуре до 60° С можно применять полиэтиленовую или полиамидную пленку. В случае клеев горячего отверждения следует применять политетрафторэтиленовую пленку. Если клей затвердевает без давления и не при повышенной температуре, достаточно на прокладку из пенополиуретана или фетра толщиной 5—10 мм наложить груз. Это обеспечивает плотное прилегание тензоэлемента к объекту регистрации при минимальной толщине слоя между ними, что важно для обеспечения малой ползучести. Если же клей затвердевает под давлением и при повышенной температуре, то лучше всего использовать соответствующие прижимные приспособления с пружинным механизмом. Если это невозможно, то следует обеспечить требуемое прижимное усилие с помощью груза.

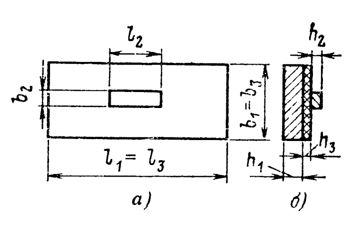


Рис. 7. Расположение тензорезистора на пружине.

а — вид сверху; *б* — вид сбоку.

Для наклеиваемого тензорезистора влияние связующего и тензочувствительного материалов на изменение режима работы элементов механической системы электроакустических преобразователей может быть пояснено на примере работы консольной балки (плоской пружины) прямоугольного сечения (рис. 7).

Податливость (величина, обратная жесткости) f_1 пружины выражается формулой

$$f_1 = 4l_1^3/E_1 b_1 h_1^3,$$

где l_1, b_1, h_1 — длина, ширина и толщина пружины; E_1 — модуль упругости материала пружины.

Податливость f_2 тензоэлемента выражается следующим образом:

$$f_2 = 4l_2^3/E_2 b_2 h_2^3,$$

где l_2, b_2, h_2, E_2 — длина, ширина, толщина и модуль упругости материала тензоэлемента соответственно.

Податливость f_3 пленки связующего, нанесенного на поверхность пружины:

$$f_3 = 4l_3^3/E_3 b_3 h_3^3,$$

где l_3, b_3, h_3 — длина, ширина и толщина пленки; E_3 — модуль упругости материала связующего.

Практически модуль упругости и толщина пленки связующего значительно меньше модуля упругости и толщины материала пружины. Кроме того, длина и толщина тензоэлемента значительно меньше длины и толщины пружины.

Для более полного подсчета f_2 необходимо пользоваться полной формулой с учетом геометрических размеров и свойств материала связующего и тензоэлемента.

На рис. 8, *а* показана упрощенная механическая модель соединения: на модели связующее изображено в виде П-образной пружины *3*, *4*. Нетрудно видеть, что полнота передачи деформации от

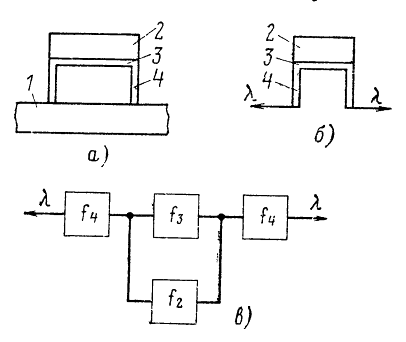


Рис. 8. Упрощенная механическая модель приклеиваемого тензоэлемента.

а — тензорезистора; *б* — тензорезистора без пружины; *в* — структурная схема нагружения системы.

пружины *1* и элементу *2* зависит от соотношения податливостей элементов *3* и *4* П-образной пружины. На рис. 8, *б* деформация пружины *1* заменена перемещением λ участков прикрепления П-образной пружины к пружине *1*. Эквивалентная структурная схема нагружения системы связующее — тензоэлемент — показана на рис. 8, *в*.

Рассчитаем деформацию λ_2 тензоэлемента при наличии деформации пружины λ_1. Из структурной схемы с учетом известных правил расчета упругих систем следует:

$$\lambda_2 = \lambda_1/[1 + 2f_4(f_2 + f_3)/f_2 f_3].$$

Из представленного выражения видно, что $\lambda_2 \to \lambda_1$, если

$$2f_4(f_2 + f_3)/f_2 f_3 = 2f_4(1/f_2 + 1/f_3) \to 0.$$

Так как обычно податливость тензоэлемента мала по сравнению с податливостью связующего, то вышеуказанное условие можно упростить:

$$f_4/f_2 \to 0.$$

Последнее условие говорит о необходимости увеличения податливости тензоэлемента f_2 и уменьшения податливости связующего f_4. Более полно этому условию отвечают тензопреобразователи, у которых податливость связующего приближается к податливости

тензоэлемента и пружины. Практически это может означать отсутствие связующего и замену его непосредственным механическим контактом пружины и тензоэлемента. Такое соединение характерно, например, для гетероэпитаксиальных тензопреобразователей (кремний на сапфире). С другой стороны, указанное выше условие более полно удовлетворяется для более податливых тензоэлементов или тензоэлементов с меньшим значением модулей упругости E. Отсюда вытекают определенные преимущества при изготовлении и использовании тензоэлементов из органических полимерных полупроводников.

Представляет интерес рассмотрение свойств применяемых для крепления чувствительных элементов эпоксидных смол и компаундов. Свойства эпоксидных смол связаны с наличием в их структуре молекул не менее двух так называемых эпоксидных групп, обусловливающих высокую реакционную способность и хорошую адгезию (прилипаемость) к различным материалам. Эпоксидные смолы, как правило, самостоятельного практического применения не находят. На основе эпоксидных смол изготовляют заливочные и пропиточные компаунды, лаки, клеи, стеклопластики. Ассортимент эпоксидных смол в нашей стране достаточно большой. Приведем лишь некоторые наиболее употребительные марки.

Смола ЭД-5 имеет относительную молекулярную массу 400, отличается большим содержанием эпоксидных групп, низкой вязкостью. В связи с этим она удобна для изготовления пропитывающих компаундов. Кроме того, смола ЭД-5 применяется для изготовления заливочных, клеящих, герметизирующих составов и т. п.

В смолах ЭД-6 и Э-37 содержатся эпоксидные группы и соответственно для них характерна большая относительная молекулярная масса (600) и большая вязкость по сравнению со смолой ЭД-5. Наиболее пластичные компаунды могут быть получены на основе смолы ЭДЛ.

Кроме смол, в состав эпоксидных компаундов и клеев обязательно входят отвердители, т. е. вещества, вызывающие необратимое отверждение смолы. Действие отвердителя сводится к «сшиванию» линейных молекулярных цепей. При этом смола теряет плавкость и растворимость, превращаясь в трехмерный полимер. В качестве отвердителей могут применяться амины, амиды или ангидриды органических двухосновных кислот, некоторые синтетические смолы. Каждый отвердитель придает эпоксидному компаунду какие-либо специфические свойства, которыми и обусловливается его применение. В зависимости от отвердителя эпоксидные смолы могут быть отверждены при комнатной температуре или при нагревании. Отвердителями холодного отверждения являются полиэтиленполиамин, гексаметилендиамин и другие амины. При применении ангидридов кислот в качестве отвердителей требуется нагрев.

Конечные свойства эпоксидных компаундов зависят не только от вида, но и от количества отвердителя. Компаунды холодного отверждения имеют, как правило, более низкую прочность и больше подвержены старению, чем компаунды горячего отверждения. Это связано с тем, что при холодном отверждении труднее удалить из массы газовые пузырьки, которые образуются при смешивании компонентов. Эпоксидные компаунды могут быть двухкомпонентными (смола и отвердитель) и многокомпонентными (смола, отвердитель, пластификатор, наполнитель, ускоритель, краситель, разбавитель). Введение наполнителя уменьшает температурный коэффициент ли-

нейного расширения компаунда и усадку при отверждении, а также повышает теплопроводность. Пластификаторы уменьшают хрупкость и повышают холодостойкость компаунда.

Для наклейки чувствительных элементов электроакустических преобразователей рекомендуются следующие отечественные клеи. ВЛ-931 (ВЛ-7)), БФ-2 и БФ-4. Рабочие диапазоны температур для ВЛ-931—190÷+110° С, для БФ-2—140÷+80° С, для БФ-4—140÷÷+60° С. Режимы полимеризации, характерные для клея ВЛ-931, следующие: 1 ч+20±5° С; 1 ч+70±10° С; 2 ч+140±10° С; не менее 2 ч+180±5° С. Режимы полимеризации для клеев БФ-2 и БФ-4: 2 ч+20±5° С; 1 ч+60±10° С; 2 ч+120±10° С; не менее 2 ч++160±5° С.

При наклейке клеями БФ-2 и БФ-4 рекомендуется прижимающее усилие до конца полимеризации.

6. Технология изготовления узлов электроакустических преобразователей

Соединение проводниковых материалов с полупроводниковыми осуществляется с помощью пайки, электроконтактной сварки и термокомпрессионной сварки.

Метод соединения пайкой является достаточно простым и позволяет осуществлять механическое соединение деталей сложной конфигурации, что затруднительно при электроконтактной сварке. Недостатки соединения пайкой следующие: неоднородность контакта из-за наличия окисных пленок, необходимость применения флюсов, загрязняющих кристалл полупроводника, и его разогрев до высоких температур (200—300° С).

Соединяемые участки желательно предварительно подвергнуть облуживанию в расплаве припоя, или с помощью ультразвукового паяльника, или путем нанесения припоя гальваническим методом. Пайку электрических выводов в виде тонких проволочек к электродам осуществляют в воздухе микропаяльником, наблюдая процесс пайки через лупу.

Применение флюсов связано с их назначением. Защитные флюсы (канифоль и ее спиртовые растворы, стеарин) только предохраняют детали и припой от воздействия кислорода, а активные флюсы (хлористый цинк, хлористый аммоний) восстанавливают окислы металлов от растворимых солей. После пайки с применением флюса конструкцию промывают деионизированной водой и сушат. Для ускорения сушки в любительских условиях можно применить фен для сушки волос. Для этого на место пайки необходимо направить струю нагретого воздуха. Другой путь ускорения сушки — отсасывание влаги с помощью пылесоса.

Изготовление электрических контактов малой площади и присоединение к кристаллу электрических проводников может быть осуществлено с помощью металлической связки. Металлический электрод или вывод покрывают слоем вязкой смеси из разлагающейся при нагреве органической связки (смеси нитроцеллюлозы с бутилацетатом) и металлического порошка (из олова, свинца и кадмия с добавлением алюминия, индия или сурьмы и фосфора). При нагреве металлический порошок плавится и плотно сцепляется с кристаллом. Можно применять также токопроводящие клеи на основе порошка из никеля или серебра.

Электрический вывод можно присоединить непосредственно к поверхности полупроводника без промежуточного металлического покрытия с помощью термокомпрессионной сварки. Для этого тонкую алюминиевую или золотую проволоку прикладывают к кристаллу полупроводника и прижимают нагретым стержнем. После небольшой выдержки проволока оказывается плотно сцепленной с поверхностью кристалла. Сцепление происходит вследствие того, что даже при небольших удельных давлениях, действующих на кристалл полупроводника и не вызывающих его разрушения, локальное давление в микровыступах на поверхности может быть весьма большим. Это приводит к пластической деформации микровыступов и микровпадин, что обусловливает прочную адгезию и надежный контакт за счет сил сцепления, а с повышением температуры между соединяемыми материалами вероятна химическая связь.

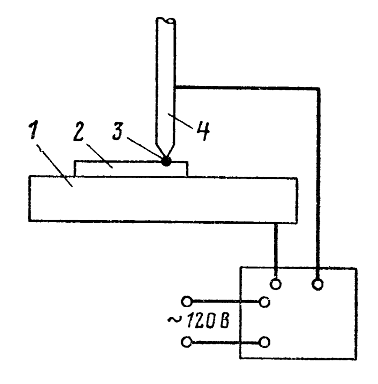


Рис. 9. Приспособление для присоединения выводов к полупроводниковому тензорезистору.

Преимущества термокомпрессионной сварки заключаются в том, что соединение деталей происходит без расплавления свариваемых материалов, а удельное давление, прикладываемое к кристаллу, не приводит к механическим повреждениям полупроводникового материала. Соединения при этом получают без загрязнений, так как не используют припои и флюсы.

Сварку термокомпрессионным способом осуществляют путем соединения внахлест и встык. При сварке внахлест, как уже отмечалось, электрический проводник накладывают на контактную площадку кристалла полупроводника и прижимают к нему специальным инструментом до возникновения деформации вывода. Ось проволочного вывода при сварке располагают параллельно плоскости контактной площадки.

При сварке встык проводник приваривают торцом к контактной площадке. Ось проволочного вывода в месте присоединения перпендикулярна плоскости контактной площадки. Сварка внахлест обеспечивает прочное соединение кристалла полупроводника с проволочными выводами из золота, алюминия, серебра и других пластичных металлов, а сварка встык — только с выводами из золота. Толщина проволочных выводов может быть от 15 до 100 мкм.

Промышленные полупроводниковые приборы обычно имеют омические контакты. Однако нередко при работе с полупроводниковыми приборами эти контакты нарушаются. Иногда требуется присоединение дополнительного контакта. В этом случае применяют описанные выше способы присоединения омических контактов к полупроводниковым материалам.

При использовании в электроакустических преобразователях полупроводниковых кремниевых тензорезисторов нередко в результате

монтажа происходит обрыв золотого проводника. Восстановить омический контакт в радиолюбительских условиях можно с помощью установки, схема которой показана на рис. 9. Установка состоит из угольной пластины *1*, на которую помещают полупроводник *2*. Золотую проволоку *3* помещают между полупроводником *2* и угольным стержнем *4*. Между угольной пластиной *1* и угольным стержнем *4* возникает разность потенциалов за счет подключения источника переменного тока напряжением 120 В [12]. Угольный стержень *4*, опускаясь, прижимает золотую проволоку *3* к кремниевому полупроводнику *2*. Прижимающее усилие должно быть не больше требуемого для удержания проволоки в нужном положении. Ток постепенно увеличивают при помощи автотрансформатора. Образованный в результате этого омический контакт механически достаточно прочен.

Глава вторая

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

7. Звукосниматель

В настоящее время как в промышленных, так и в любительских радиолах и электропроигрывающих устройствах применяются в основном пьезоэлектрические звукосниматели. Это связано с их достаточно высокой чувствительностью, простотой конструкции и дешевизной.

Однако пьезоэлектрические звукосниматели имеют существенный недостаток — высокое внутреннее сопротивление (около нескольких сотен килоом). В переносных электропроигрывающих устройствах и радиолах с батарейным питанием целесообразно применять усилители на транзисторах, которые имеют относительно низкое входное сопротивление (до 5—10 кОм). Применение эмиттерных повторителей в таких устройствах нецелесообразно. В этом случае для согласования входного сопротивления усилителя с внутренним сопротивлением звукоснимателя приходится последовательно с входным сопротивлением первого каскада усилителя включать резистор сопротивлением несколько сотен килоом. Таким образом, на входе усилителя фактически включается делитель напряжения, и сигнал, снимаемый со звукоснимателя, уменьшается при этом почти в 100 раз. Это заставляет соответственно увеличивать коэффициент усиления усилителя, т. е. применять транзисторы с более высоким коэффициентом усиления, добавлять лишний каскад усиления и более тщательно выполнять монтаж для предотвращения паразитных обратных связей.

Ниже приводится описание звукоснимателя, свободного от указанных недостатков. Такой звукосниматель можно использовать не только в батарейных радиолах и электропроигрывателях, но и в других звуковоспроизводящих устройствах. Внутреннее сопротивление такого звукоснимателя составляет всего несколько сотен ом, а остальные его параметры не хуже, чем у пьезоэлектрического звукоснимателя.

Предлагаемый звукосниматель смогут самостоятельно изготовить радиолюбители средней квалификации. Масса звукоснимателя без тонарма не превышает 1 г. Для его изготовления достаточно иметь любой маломощный транзистор горячесварной конструкции, например МП40, МП41 и др.

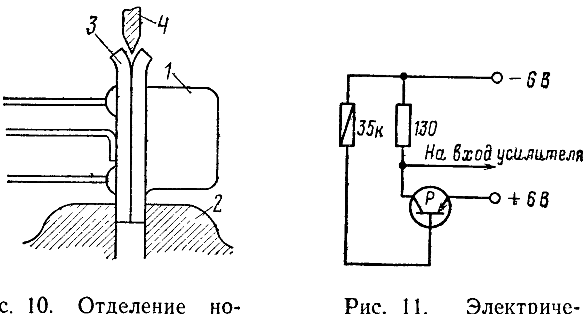


Рис. 10. Отделение ножом крышки корпуса транзистора от его основания.

Рис. 11. Электрическая схема подключения микрозвукоснимателя к усилителю.

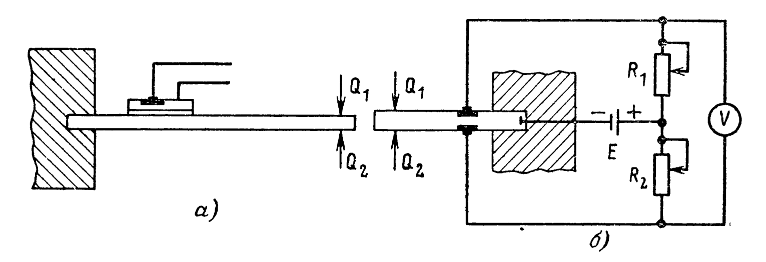


Рис. 12. Узлы тензорезистивных звукоснимателей.

а — с одним тензорезистором; *б* — с двумя тензорезисторами.

Прежде всего нужно аккуратно удалить крышку *1* корпуса транзистора (рис. 10). Это удобно сделать, зажав в тиски *2* фланец *3*, которым крышка корпуса приварена к его основанию. Затем лезвие острого ножа *4* ставят в торец сварного шва и по тыльной стороне ножа наносят не сильный удар молотком. Большинство транзисторов имеет достаточно хрупкий сварной шов, который под ударом расщепляется. Постепенно поворачивая транзистор и перемещая нож вдоль шва по окружности, крышку корпуса отделяют от основания. При этой операции нужно следить, чтобы нож не проник слишком глубоко и не повредил внутренний монтаж транзистора.

Схема подключения микрозвукоснимателя к усилителю показана на рис. 11. Транзистор микрозвукоснимателя питается от того же источника, что и усилитель.

Микрозвукосниматель при проигрывании грампластинки средней громкости развивает напряжение в несколько десятков милливольт.

Для сравнения заметим, что пьезокристаллический звукосниматель УЗ-2 при этих же условиях дает напряжение 200—300 мВ на нагрузке сопротивлением 400 кОм, причем напряжение, развиваемое звукоснимателем УЗ-2, начинает заметно снижаться при сопротивлениях нагрузки, меньших 150—200 кОм. Следовательно, с нагрузки сопротивлением 600 Ом можно снять напряжение менее 1 мВ, что в десятки раз меньше, чем дает микрозвукосниматель.

На рис. 12, *а* и *б* показаны узлы двух звукоснимателей, использующих тензорезисторы. В узле, изображенном на рис. 12, *а*, используется один тензорезистор; в узле, изображенном на рис. 12, *б*, — два, включенных по мостовой схеме. Движение иглы по пластинке создает усилия Q_1 и Q_2, деформирующие тензорезисторы. Выходной сигнал контролируется вольтметром U. Питание схемы осуществляется от источника напряжения E. Балансировка моста осуществляется резисторами R_1 и R_2.

Тензорезисторы крепят на упругой пластинке ближе к месту ее крепления в корпусе звукоснимателя.

8. Микрофон

В радиолюбительской практике электроакустические преобразователи применяются также для изготовления микрофонов. Впервые микрофон был изготовлен Бернсом [10]. Этот микрофон был осно-

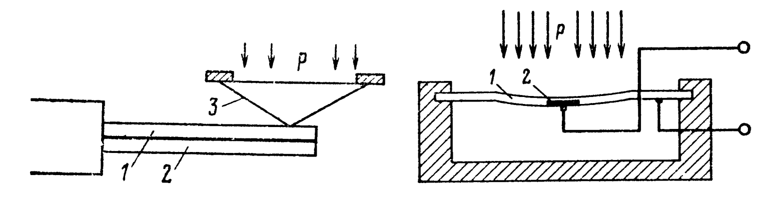


Рис. 13. Пьезорезистивный микрофон.

Рис. 14. Микрофон с диффузионной диафрагмой.

ван на пьезорезистивном эффекте. Конструкция такого микрофона представлена на рис. 13. Две пластинки *1* и *2*, выполненные из полупроводникового материала, склеены вместе изолирующим клеем. Один конец этих пластинок закреплен, а к свободному концу присоединена диафрагма *3* микрофона. Обе пластинки электрически соединены в месте закрепления. К свободным концам пластинок присоединены два провода. Для измерений можно использовать мостовую схему. При работе устройства в качестве микрофона ток через мост поддерживается постоянным. Если давление направлено вниз, то сопротивление верхней пластинки уменьшается вследствие ее растяжения, а сопротивление нижней пластинки возрастает, так как она сжимается. Полное сопротивление и ток остаются при этом постоянными. Выходной сигнал схемы снимается с плеча моста, включающего один пьезорезистивный элемент.

Микрофон другого типа (рис. 14) состоит из тонкой монокристаллической диафрагмы *1*, на верхнюю поверхность которой методом диффузии нанесен слой, обладающий высокой проводимостью. Ток

в этом слое течет параллельно поверхности диафрагмы. Сопротивление может быть сосредоточено в малой полосе *2*, расположенной в центре диафрагмы. Действующее на диафрагму давление *p* вызывает двухосное сжатие поверхности. Это приводит к изменению сопротивления полосы. Максимальное изменение сопротивления достигается подбором материалов и кристаллографической ориентации. Дальнейшим усовершенствованием этой системы является конструкция с *p-n*-переходом на одной стороне диафрагмы. При этом давление изменяет сопротивление *p-n*-перехода.

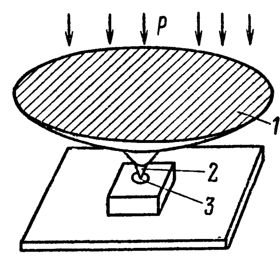


Рис. 15. Микрофон на туннельном диоде (с использованием иглы).

Микрофон подобного типа можно изготовить и с туннельным диодом путем прикрепления пластинки диода к металлической диафрагме. В микрофоне, представленном на рис. 15, применен туннельный *p-n*-переход, а давление на него передается через систему диафрагма *1* — игла *2* — *p-n*-переход *3*. Другой метод передачи давления изображен на рис. 16 (на нем не указано соотношение размеров диафрагмы и *p-n*-перехода). В этом микрофоне пластина кремния (*n*-типа) *1* выполнена с туннельным *p-n*-переходом *2*. Электродами служат проволочка *3* из алюминия с содержанием 1% брома и золотая проволочка *4*. Передача давления осуществляется алюминиевой проволочке *3* от диафрагмы *5*. В такой конструкции коэффициент механической трансформации может быть около 10^6 и больше.

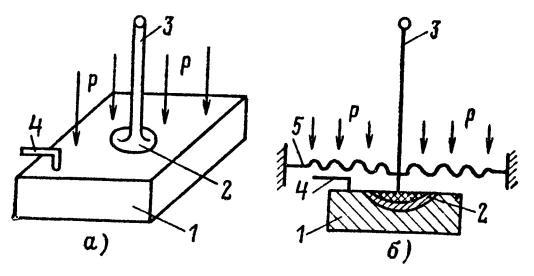


Рис. 16. Микрофон на туннельном диоде (без иглы).

а — без диафрагмы; *б* — схема с диафрагмой.

Преимуществами микрофонов с туннельными диодами являются высокая чувствительность при низком значении собственного сопротивления, отсутствие необходимости защиты поверхности от влияния внешней среды, так как ток через туннельный диод не чувствителен к поверхностным загрязнениям. Собственный шум туннельных диодов также не зависит от поверхностных загрязнений.

Схема экспериментального устройства, служащего для приложения механических напряжений в направлении, перпендикулярном

плоскости, *p-n*-перехода, представлена на рис. 17. Игла *1* служит здесь также для создания электрического контакта с одной стороны *p-n*-перехода *2*; электрический контакт с другой стороны обеспечивается за счет монтажа диода. Для подключения устройства слу-

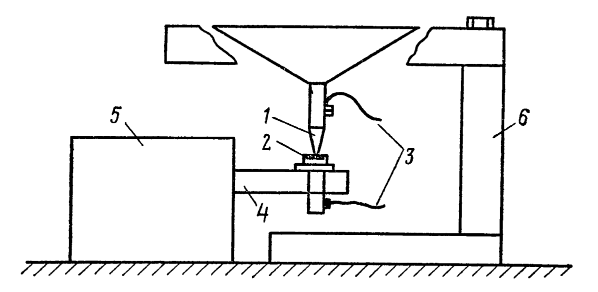


Рис. 17. Устройство для приложения механических напряжений в направлении, перпендикулярном плоскости *p-n*-перехода.

жат выводы *3*. Элемент с *p-n*-переходом *2* крепится в консоли *4* корпуса *5*. Диафрагма закреплена в кронштейне *6*.

С целью получения максимальной чувствительности к давлению, т. е. для получения наибольшего сигнала по напряжению, туннельный диод можно шунтировать резистором и работать в режиме усиления.

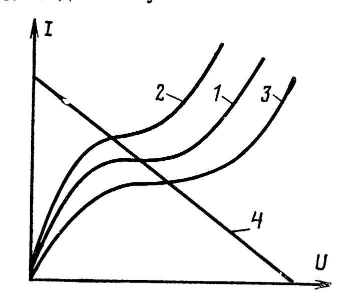


Рис. 18. Работа шунтированного туннельного диода для микрофона.

1 — без нагрузки; *2* — с нагрузкой; *3* — с нагрузкой противоположного знака; *4* — нагрузочная прямая.

Работа шунтированного туннельного диода, используемого в качестве чувствительного элемента микрофона, проиллюстрирована графиком, приведенным на рис. 18.

При другой схеме подачи электрического смещения на туннельный диод точка смещения выбирается на втором участке положительного сопротивления вольт-амперной характеристики. Давление передается на туннельный *p-n*-переход при помощи системы диафрагма — контактная игла. Второй участок положительного сопротивления вольт-амперной характеристики туннельного диода смещается под действием силы, направленной перпендикулярно плоскости перехода. Изготовленный с туннельным диодом микрофон имеет резкий пик выходного сигнала при частоте 2500 Гц [10]. При этом отношение сигнал/шум для звукового давления 1 Па составляет 34 дБ.

Обычные выпрямительные диоды можно применить для измерения напряжений и деформаций в тех случаях, когда желательно получить большие сигналы по напряжению, а действующее давление

не является всесторонним. При этом необходимо помнить, что мощность, выделяемая в подобных устройствах, невелика. Это объясняется тем, что диоды, имеющие малые токи утечки, являются отличными выпрямителями и токи, соответствующие обратной ветви, очень малы и составляют единицы и доли микроампер. Для получения большей выходной мощности, достаточной для питания громкоговорителя, сигнал можно подать на каскад усилителя на транзисторе.

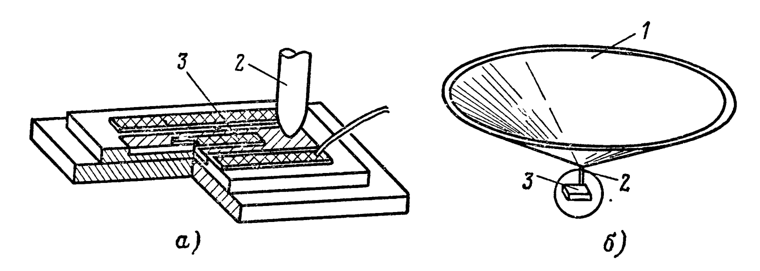


Рис. 19. Конструкция транзисторного микрофона.

а — разрез транзистора; *б* — общий вид микрофона.

Хорошие результаты дает конструкция микрофона с полупроводниковым диодом, обладающим большой мощностью *p-n*-перехода, и с механической системой, состоящей из диафрагмы и алмазного острия. Для таких устройств может быть получено выходное напряжение до 2 В при звуковом давлении 0,02 Па в диапазоне частот от 0 до 100 кГц.

В связи с тем, что микрофоны с туннельными диодами имеют ограничение по напряжению, в качестве чувствительных элементов используются транзисторы, вольт-амперная характеристика которых по виду напоминает характеристику шунтированных туннельных диодов. Применение транзисторов дает вполне определенные преимущества: нет необходимости в электрической стабилизации; средняя часть вольт-амперной характеристики транзисторов допускает изменение напряжений, в 10^3—10^4 раз большее, чем для туннельных диодов; наличие второго перехода позволяет усиливать ток и, следовательно, получать большую выходную мощность.

Конструкция транзисторного микрофона показана на рис. 19, *б* [10]. Механическое напряжение в данном случае создается при помощи острия со сферическим концом малого радиуса. Основными деталями этого микрофона являются диафрагма *1*, сапфировая игла *2* с радиусом острия 25 мкм, которая крепится снизу к диафрагме после удаления угольного порошка, и транзистор *3*, например, типа *n-p-n*. На рис. 19, *а* показан разрез транзистора *3* и положение острия *2* на его поверхности. Игла упирается в область эмиттера, причем поверхность под ней не покрыта напыленным металлом. Это необходимо потому, что слой напыленного металла на эмиттере относительно толст и при передаче через него давления механические напряжения распределяются на большую площадь. В случае, когда игла упирается в металл, чувствительность к давлению заметно падает, т. е. для того же давления, действующего

на иглу, смещение вольт-амперной характеристики транзистора становится значительно меньшим, чем при отсутствии металлического слоя.

Если нагрузка, прикладываемая к игле, не превышает нескольких граммов, то наблюдаются вполне обратимые изменения коллекторного тока, причем с увеличением нагрузки вольт-амперная характеристика смещается вниз параллельно самой себе. При наличии механической системы, создающей дополнительный коэффициент усиления $3 \cdot 10^8$, при давлении 0,1 Па изменение напряжения составит около 250 мВ. Требуемый коэффициент механической трансформации получается при монтаже сапфировой иглы на диафрагме с эффективной площадью 20 см^2 [10].

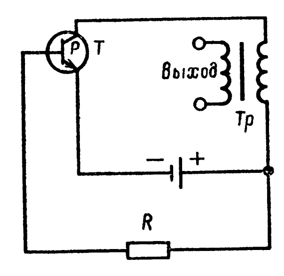


Рис. 20. Электрическая схема транзисторного микрофона.

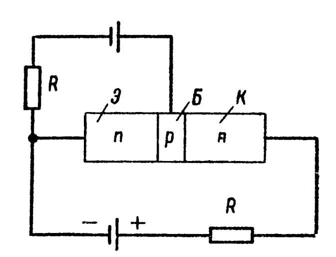


Рис. 21. Электрическая схема транзисторного микрофона на двух батареях.

В подобного типа микрофонах на диафрагму действует не статическое, а динамическое давление. При действии на диафрагму звуковой волны усилие через иглу передается на транзистор. Вследствие этого смещаются вольт-амперные характеристики обоих транзисторных переходов, причем проводимость перехода эмиттер — база подвергается воздействию в большей степени.

Поскольку наибольшее усиление мощности получается при работе транзистора в схеме с общим эмиттером, для транзисторного микрофона лучше использовать именно эту схему. Электрическая схема транзисторного микрофона показана на рис. 20. В качестве источника питания микрофона служит сухой элемент. К вторичной обмотке трансформатора *Тр* присоединяются наушники. Если используются наушники с большим входным сопротивлением, то трансформатор можно исключить. Можно применять также схему с двумя батареями, как это имеет место на рис. 21.

Для установки транзистора точно под иглой можно использовать систему координатных винтов. Вертикальный установочный винт может служить при этом не только для того, чтобы привести поверхность транзистора в соприкосновение с иглой, но и для того, чтобы создать определенную статическую нагрузку, необходимую для получения достаточной чувствительности микрофона к давлению.

Основными характеристиками микрофона являются чувствительность, равная отношению среднеквадратического (эффективно-

го) значения выходного переменного напряжения к действующему звуковому давлению; усиление по мощности; коэффициент полезного действия, равный отношению мощности выходного переменного сигнала к потребляемой мощности постоянного тока.

Экспериментальные исследования показали, что рассматриваемый транзисторный микрофон почти в 4 раза чувствительнее, чем угольный, имеет большее усиление по мощности и более высокий к. п. д.

Для транзисторного микрофона отношение сигнал/шум для звукового давления 0,1 Па на частоте 1 кГц составляет 54 дБ, коэффициент гармоник на частоте 1 кГц при звуковом давлении 0,3 Па меньше 3%. Частотная характеристика в основном повторяет частотную характеристику применяемой диафрагмы.

При использовании транзисторов в микрофоне можно применять и другие способы создания механических напряжений. Например, можно укрепить транзистор на металлической диафрагме или использовать в качестве деформируемой диафрагмы саму пластинку полупроводника. Транзисторные *p-n*-переходы на такой полупроводниковой диафрагме можно получать путем диффузии или выращивать эпитаксиально.

Такие характеристики транзисторных микрофонов, как большое отношение сигнал/шум, большое усиление и малая потребляемая мощность, позволяют делать их очень малыми, что очень существенно для слуховых аппаратов и т. д.

Особый интерес представляет использование в микрофонах многослойных структур, например тиристоров, имеющих участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, что позволяет использовать их при построении генераторов, чувствительных к механическому воздействию.

9. Датчик давления

Рассмотрим некоторые конструктивные исполнения датчиков давления, в которых используются полупроводниковые тензочувствительные элементы.

Одна из конструкций датчиков давления с полупроводниковым тензочувствительным элементом представлена на рис. 22. Она состоит из основания *1* из железоникелевого сплава с нулевым коэффициентом теплового расширения, чувствительного элемента *2*, слоя припоя *3*, крышки *4*, слоя эпоксидного клея *5*, элемента *6* для передачи давления от крышки *4* к чувствительному элементу *2*, электродов *7* и *8*, изолятора *9*.

Сопротивление чувствительного элемента *2* зависит от давления на крышку *4*. Слой эпоксидного клея *5* обеспечивает герметичность соединения крышки *4* с основанием *1* во всем диапазоне рабочих давлений.

Другая конструкция полупроводникового датчика давления показана на рис. 23. Она состоит из основания *1*; изолятора *2*; электродов *3* и *4*; чувствительного полупроводникового элемента *5*; электрического контакта *6*; крышки *7*; обоймы *8*; места крепления крышки к основанию *9*; штока *10*, передающего давление от крышки *7* к чувствительному полупроводниковому элементу *5*; герметичной пробки *11* из эпоксидной смолы.

После размещения электродов *3* и *4* и чувствительного полупроводникового элемента *5* крышка *7* крепится к основанию *1* по-

средством склейки, после чего через обойму *8* внутрь датчика вводится шток *10* и производится герметизация с помощью пробки *11*.

Преимуществом рассмотренной конструкции является то, что в ней в процессе сборки можно регулировать начальное давление.

На рис. 24 приведена конструкция датчика давления с туннельным диодом таблеточного типа. Измеряемое давление *p* воздействует на полупроводниковый кристалл *1* с *p-n*-переходом *2* через мембрану *3*. Корпус *4* соединяется с верхним выводом *5* и нижним выводом *6*. С измеряемой средой датчик связан через штуцер *7*. Датчик отличается повышенной чувствительностью к давлению. Особенно значительно изменение отношения максимального тока к минимальному, которое даже при незначительном давлении резко снижается. Физически это объясняется сильной зависимостью максимального тока от плотности туннельного тока через *p-n*-переход, которая тем больше, чем больше вероятность туннельного эффекта

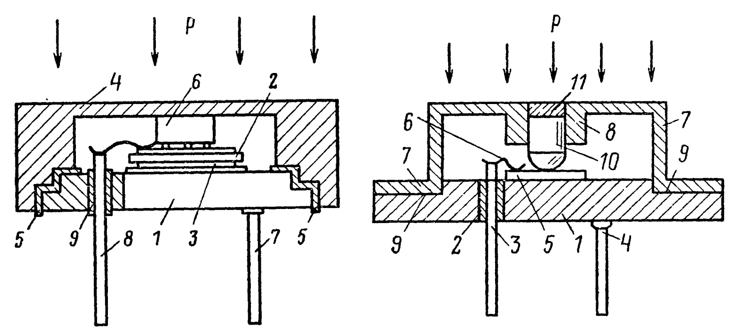


Рис. 22. Конструкция датчика давления.

Рис. 23. Конструкция датчика давления.

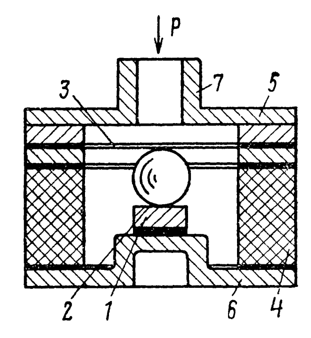


Рис. 24. Конструкция датчика давления с туннельным диодом таблеточного типа.

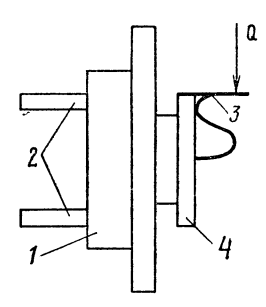


Рис. 25. Схема для измерения малых усилий на транзисторе.

(больше концентрация примеси, у́же переход). Кроме того, максимальный ток пропорционален площади *p-n*-перехода и зависит от свойств материала.

Схема для измерения малых усилий приведена на рис. 25. В качестве чувствительного к механическому усилию элемента здесь использован транзистор П210А. На схеме приняты следующие обозначения: *1* — корпус транзистора, *2* — электроды, *3* — воспринимающий усилие элемент, *4* — *p-n*-переход.

С транзистора снята защитная крышка, к *p-n*-переходу приложено усилие Q с помощью жесткого крепления электрода с точкой приложения нагрузки. Сильная зависимость тока от изменения механической нагрузки объясняется значительными механическими напряжениями, возникающими во всей области *p-n*-перехода. Подобный полупроводниковый элемент может быть легко применен для измерения давлений. Для этого необходимо точку крепления электрода жестко связать с подвижным центром мембраны, которая будет выполнять также защитные функции. После вакуумирования подмембранной области датчик может измерять абсолютные давления.

10. Измерители шероховатости

Высокая чувствительность полупроводниковых электроакустических преобразователей позволяет использовать их в качестве измерителей шероховатостей. Степень шероховатости (чистота) поверхностей в сочетании с точностью геометрической формы оказывает большое влияние на качество и эксплуатационные свойства неподвижных и подвижных соединений деталей. В большой степени это относится и к деталям, образующим электроакустический преобразователь. Известно, какие большие требования предъявляются к качеству обработки поверхности полупроводниковых материалов.

Шероховатость поверхности определяется неровностями, представляющими собой впадины и выступы («гребешки») различной формы. Эти неровности имеют малые шаги. Измерителем шероховатости можно измерить также направление штрихов, следов механической обработки.

Измерение шероховатости с помощью полупроводникового электроакустического преобразователя относится к контактным методам измерения. Этим методом оцениваются микронеровности при соприкосновении чувствительного элемента с испытуемой поверхностью. Принцип действия измерителя шероховатости основан на «ощупывании» поверхности иглой и замере или записи перемещения иглы. Вертикальные перемещения ощупывающей иглы усиливаются и регистрируются стрелкой на соответствующей шкале или записываются в виде профилограмм исследуемых поверхностей.

На рис. 26 приведена структурная схема тензометрического профилометра. Полупроводниковый тензометрический профилограф работает следующим образом. При движении исследуемой поверхности *1* ощупывающая игла *2* воспринимает усилия, уравновешиваемые силами деформации упругой балки *3*. Балка *3* консольно закреплена в неподвижном корпусе прибора. Полупроводниковые тензорезисторы *4* помещены на обеих противоположных поверхностях упругой балки *3* ближе к ее заделке в корпусе прибора. Полупроводниковые тензорезисторы могут быть либо наклеены на балку

каким-либо связующим, либо выращены на ней. В первом случае упругая балка *3* изготовляется из пружинной стали, во втором — из упругого изоляционного материала, например сапфира или кварца. Полупроводниковые тензорезисторы могут быть помещены на стальной балке через диэлектрический слой. В качестве такого слоя может использоваться либо окисная пленка, либо напыленный ди-

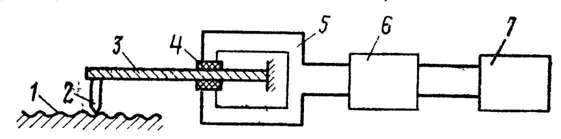


Рис. 26. Структурная схема тензометрического профилометра.

электрик. Известно использование в качестве диэлектрического слоя пленки окиси алюминия. В этом случае упругая балка выполняется из алюминия или его сплавов.

Если на упругой балке *3* расположены два тензорезистора, они соединяются по схеме полумоста и с помощью электрических выводов *5* подключаются к электропреобразовательному блоку *6*. Сигнал с электропреобразовательного блока *6* поступает на регистрирующий прибор *7*. Электропреобразовательный блок содержит второй полумост, элементы настройки и регулирования, а также усилитель (если он требуется). Через электропреобразовательный блок производится также питание тензометрического моста.

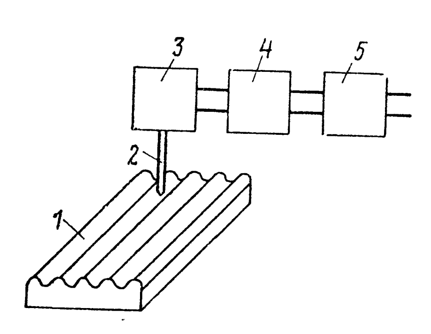


Рис. 27. Структурная схема измерителя шероховатости.

На упругой балке *3* могут быть расположены четыре тензорезистора, включенные по схеме моста. Этим достигается повышенная термостабильность и линейность схемы. Питание моста осуществляется от стабилизированных источников питания, выпускаемых серийно отечественной промышленностью или изготовленных самими радиолюбителями.

В качестве регистрирующего прибора *7* используются стрелочные, цифровые или записывающие приборы. При выборе типа регистрирующего прибора необходимо иметь в виду скорость относительного перемещения исследуемого объекта *1* и иглы *2* с тем, чтобы привести в соответствие быстродействие прибора *7* и скорость измерения.

На рис. 27 приведена структурная схема другого измерителя шероховатости или профилометра, использующего электроакустические полупроводниковые элементы с *p-n*-переходами.

Если в тензометрическом профилометре усилие от иглы передается тензорезисторам через упругую балку, то здесь усилие от иглы

2 непосредственно воздействует на полупроводниковый элемент *3* с *p-n*-переходами, образуя в последнем механические напряжения. Изменение механических напряжений в области *p-n*-перехода служит показателем наличия шероховатости поверхности *1*, которая подлежит исследованию. Изменение параметров *p-n*-перехода полупроводникового элемента вызывает изменение электрических параметров электропреобразовательного блока *4*, сигнал с которого поступает на регистрирующий прибор *5*.

Особенностью описанного выше прибора является то, что в нем игла *2* служит как для ощупывания исследуемого объекта *1*, так и для создания локальных напряжений в области *p-n*-перехода полупроводникового элемента *3*. С разных сторон игла *2* имеет разные радиусы закругления. Со стороны *p-n*-перехода радиус закругления выбирается исходя из требований получения необходимой чувствительности и допустимых механических напряжений, а со стороны исследуемого объекта — из предполагаемой чистоты поверхности. Не допускается, чтобы игла царапала исследуемую поверхность. Выходной сигнал такой же, как у описанных ранее звукоснимателей.

Глава третья

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

11. Питание электроакустических преобразователей

Широкое применение в источниках питания получили различные полупроводниковые приборы. Это вызвано такими свойствами полупроводниковых приборов, как, например, малым падением напряжения на диодах, хорошими ключевыми свойствами транзисторов и тиристоров, малым падением напряжения на регулирующих транзисторах, работающих в линейном режиме и т. д.

Для питания радиоустройств с электроакустическими преобразователями применяются источники напряжения переменного и постоянного токов. Колебания напряжения во многих случаях оказываются недопустимыми, так как приводят к нарушению нормальной работы радиоаппаратуры. Стабилизируемая величина (напряжение или ток) должна сохраняться на заданном уровне не только при колебаниях питающего напряжения, но и при изменении окружающих условий, например температуры окружающей среды. Одним из основных параметров стабилизатора напряжения является стабильность выходного напряжения. Она зависит от целого ряда факторов, таких, как колебания питающего напряжения и его частоты (для стабилизатора переменного тока), изменение сопротивления нагрузки, температуры окружающей среды и элементов самого стабилизатора и т. д. Влияние колебаний питающего напряжения характеризуется коэффициентом стабилизации

$$k = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \Big/ \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}},$$

где $U_{вх}$ и $U_{вых}$ — значения входного и выходного напряжений; $\Delta U_{вх}$ и $\Delta U_{вых}$ — изменения входного и выходного напряжений.

Коэффициент стабилизации представляет собой безразмерную величину, определяющую, во сколько раз относительное изменение выходного напряжения (тока) меньше относительного изменения входного напряжения (тока). Для различного типа стабилизаторов значение коэффициента стабилизации может меняться в широких пределах — от единиц до тысяч. По известным значениям коэффициента стабилизации и колебаний питающего (входного) напряжения можно определить стабильность выходного напряжения или тока.

Различают параметрические и компенсационные стабилизаторы. Параметрическими стабилизаторами называются устройства, в которых стабилизация осуществляется за счет нелинейности характеристик приборов, на которых они построены. Схема включения этих приборов и линейных элементов выбирается так, чтобы при изменении питающего напряжения выходное напряжение (или ток) изменялись бы значительно меньше. Параметрические стабилизаторы представляет собой разомкнутую систему автоматического регулирования.

Компенсационными стабилизаторами называются устройства, в которых действительное напряжение (или ток) на выходе сравнивается с заданным значением напряжения (или тока) и в результате сравнения вырабатывается разностный сигнал, который усиливается и воздействует на исполнительный элемент стабилизатора до тех пор, пока этот разностный сигнал не станет близким к нулю. Компенсационные стабилизаторы представляют собой замкнутую систему автоматического регулирования.

Находят применение также стабилизаторы, называемые комбинированными или компенсационно-параметрическими, в которых одновременно используются принцип действия и параметрического, и компенсационного стабилизаторов.

Для параметрических стабилизаторов применяются различные нелинейные элементы, как активные, так и реактивные. Из полупроводниковых приборов в параметрических стабилизаторах нашли применение терморезисторы, кремниевые стабилитроны, варисторы, вольт-амперные характеристики которых имеют участок, почти параллельный оси токов, что позволяет использовать эти элементы для стабилизации напряжения.

Особенно эффективны в этом отношении кремниевые стабилитроны Д803—Д813. Их вольт-амперная характеристика показана на рис. 28. Кремниевые стабилитроны имеют целый ряд преимуществ по сравнению с газоразрядными лампами и нормальными элементами: 1) кремниевые стабилитроны не имеют так называемого потенциала зажигания, который выше напряжения стабилизации газоразрядных стабилитронов; 2) путем изменения состава примесей можно изготовить кремниевые стабилитроны на широкий диапазон напряжений; 3) кремниевые стабилитроны не «стареют» в течение нескольких тысяч часов, вследствие чего можно говорить о практически неограниченном сроке службы; 4) в них не наблюдается скачкообразного изменения напряжения; 5) они имеют малые размеры; 6) обладают более низким внутренним сопротивлением, чем нормальные элементы; 7) могут работать в любом положении, в то время как нормальные элементы должны всегда располагаться вертикально; 8) допускают больший ток нагрузки, чем нормальные элементы.

Простейшая схема параметрического стабилизатора напряжения показана на рис. 29. Напряжение пробоя кремниевых стабилитро-

нов зависит от температуры окружающей среды. Температурный коэффициент отечественных стабилитронов составляет примерно 0,1 %/°C, что является весьма существенной величиной. Исследование полупроводниковых стабилитронов показало, что почти во всех режимах работы температурный коэффициент стабилитронов, включенных в прямом направлении, имеет обратный знак по сравнению

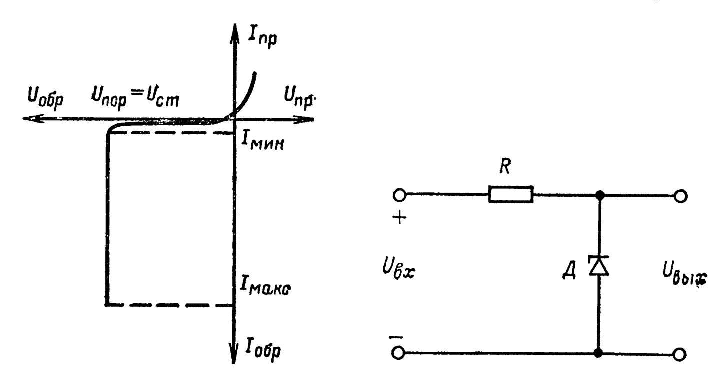


Рис. 28. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона.

Рис. 29. Простейшая схема параметрического стабилизатора.

с температурным коэффициентом стабилитронов, включенных в обратном направлении. Поэтому, как правило, температурное изменение стабилитронов компенсируется включением их в разных направлениях. Это позволяет свести почти до нуля влияние температуры среды на работу параметрических стабилизаторов напряжения со стабилитронами. При температурной компенсации необходимо, чтобы все элементы находились в одинаковых температурных условиях.

12. Электроакустические преобразователи с простейшими четырехполюсниками

К электроакустическим преобразователям с простейшими четырехполюсниками можно отнести схемы с делителем напряжения. Схемы с делителем напряжения и электроакустическим чувствительным элементом в виде тензорезистора рассмотрены в [13].

На современном уровне развития электроакустических преобразователей представляют интерес схемы с делителем напряжения и тензодиодом (тензочувствительным *p-n*-переходом). Работа электроакустических преобразователей на тензодиодах с прямым смещением основана на зависимости падения напряжения на тензодиоде от тензонапряжения или локального давления. Простейшая схема такого электроакустического преобразователя представлена на рис. 30, *а*. Если напряжения $U_{пит}$ и сопротивление резистора R выбраны достаточно большими, то ток через тензодиод остается практически постоянным. Колебание тока, протекающего через тензодиод,

приводит не только к нелинейности шкалы, снижению чувствительности, но и к потреблению большей мощности от батареи. Характеристики тензодиодов при повторении цикла отличаются хорошей воспроизводимостью.

Преимуществами тензодатчика, использующего обратную ветвь вольт-амперной характеристики, являются высокая чувствительность, малое потребление тока и малая зависимость тока от колебаний напряжения питания и сопротивления резистора нагрузки. Это

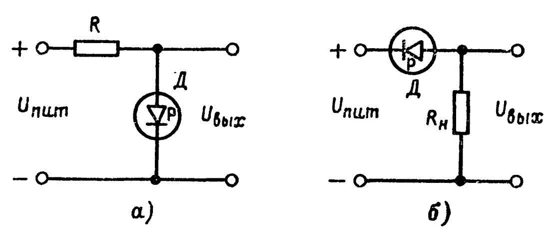


Рис. 30. Простейшие схемы электроакустических преобразователей на тензодиодах.

а — тензодиод смещен в прямом направлении; *б* — тензодиод смещен в обратном направлении.

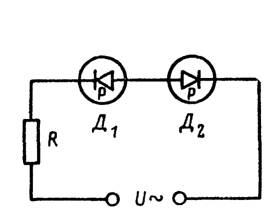


Рис. 31. Простейшая схема электроакустического преобразователя с тензодиодами, смещенными в обратном направлении.

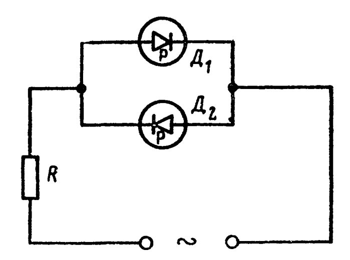


Рис. 32. Простейшая схема электроакустического преобразователя с тензодиодами, смещенными в прямом направлении.

объясняется тем, что в рабочем диапазоне температур вольт-амперные характеристики тензодиода, смещенного в обратном направлении, почти параллельны оси напряжений и характерны для стабилизаторов тока. С ростом температуры окружающей среды электроакустический преобразователь становится более критичным к колебаниям напряжения питания и сопротивления резистора нагрузки вследствие того, что наклон характеристик к оси напряжений увеличивается.

Простейший электроакустический преобразователь этого типа представляет собой тензодиод, смещенный в обратном направлении и включенный последовательно с нагрузкой. Такой преобразователь может работать как с низкоомной, так и с высокоомной нагрузками (рис. 30, *б*).

Простейшие электрические схемы электроакустических преобразователей, работающих на переменном токе и использующих диоды, смещенные в обратном и прямом направлениях, показаны на рис. 31 и 32 соответственно.

Рассмотрим схемы электроакустических преобразователей с делителем напряжения и тензотранзистором. Включение тензотранзистора в этом случае возможно по схемам, представленным на рис. 33. В схемах рис. 33, *а, б* используются обратносмещенные эмиттерный и коллекторный переходы при включении тензотранзи-

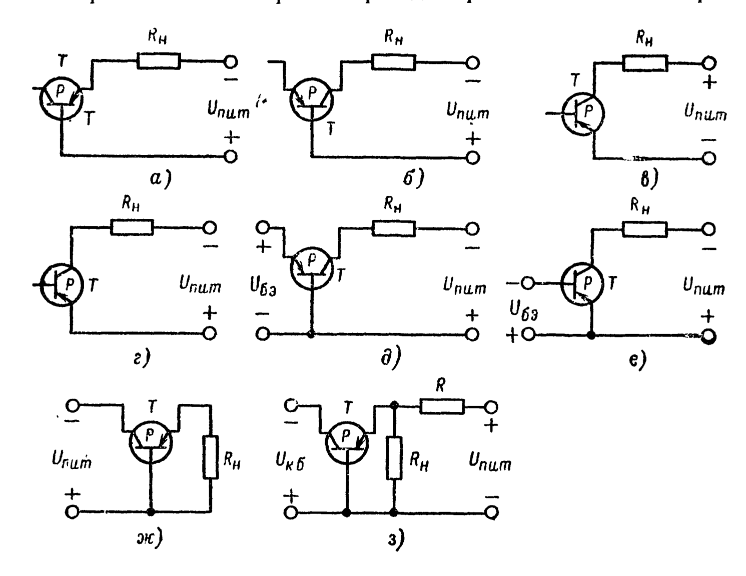


Рис. 33. Простейшие схемы электроакустических преобразователей на тензотранзисторах, используемых в качестве двухполюсника (*а — г*) и четырехполюсника (*д — з*).

стора по схемам со свободным коллектором и свободным эмиттером соответственно. В схемах, приведенных на рис. 33, *в, г*, в зависимости от полярности включения источника питания используется либо тензозависимость тока эмиттера (рис. 33, *в*) при отрицательном смещении эмиттера, либо тока коллектора (рис. 33, *г*) при отрицательном смещении коллектора. Простейшая схема электроакустического преобразователя с тензотранзистором, включенным по схеме с общей базой, показана на рис. 33, *д*, а с тензотранзистором, включенным по схеме с общим эмиттером, — на рис. 33, *е*.

Электроакустический преобразователь, изображенный на рис. 33, *ж*, отличается малой чувствительностью к колебаниям напряжения питания. Преобразователь, показанный на рис. 33, *з*, позволяет повысить точность измерения за счет применения прибора с малым пределом измерений.

При линейном режиме работы, рекомендуемом для повышения точности чувствительных элементов электроакустических преобра-

зователей, как у обратносмещенного тензодиода, так и у тензотранзистора используется тот участок вольт-амперной характеристики, на котором не возникает заметного разогрева рабочего тела чувствительного элемента. Вольт-амперные характеристики тензодиода и тензотранзистора приведены на рис. 34, *а*, *б*, где цифрой *1* обозначен рекомендуемый участок работы чувствительного элемента преобразователя, а цифрами *2* и *3* — нежелательные участки.

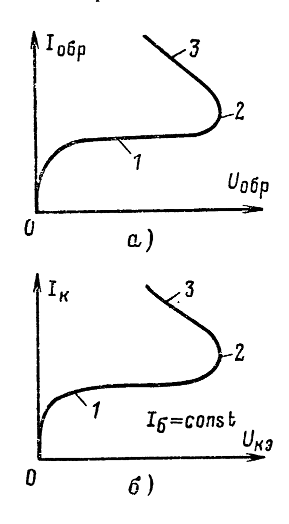


Рис. 34. Вольт-амперные характеристики тензодиода (*а*) и тензотранзистора (*б*).

Для электроакустических преобразователей на тензотранзисторах характерна более высокая чувствительность, чем для тензодиодов, а также возможность регулировки и настройки на необходимый диапазон изменений тензонапряжений или локальных давлений.

Экспериментально установлено, что чувствительные элементы электроакустических преобразователей, выполненных на основе тензодиодов и тензотранзисторов, работоспособны в диапазоне температур от 70 до 453 К (—203÷+ +180° С).

Представляют интерес схемы электроакустических преобразователей с тензотранзисторами, показанные на рис. 35, *а—г* и на рис. 35, *д*, *е*, в которых коллекторный и эмиттерный переходы включены параллельно друг другу, но смещены в первом случае в прямом направлении, а во втором случае — в обратном. В каждой из этих схем благодаря совмещению двух диодов в одном транзисторе чувствительность преобразователя возрастает примерно вдвое.

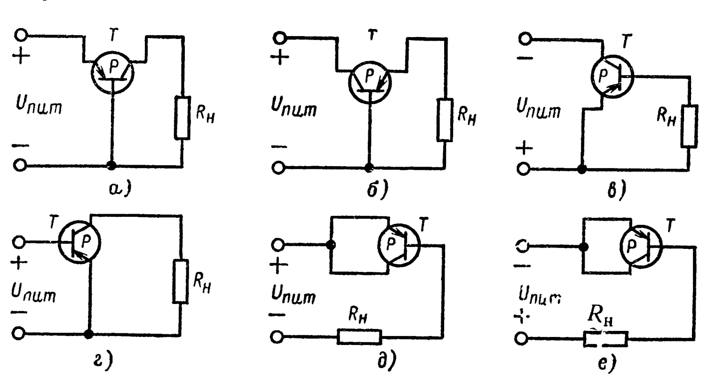


Рис. 35. Схемы электроакустических преобразователей с тензотранзистором и одним источником питания.

Используя различные сочетания полярностей, можно включать тензотранзистор в схему с делителем напряжения как прибор, обладающий свойствами тензодиода, смещенного в прямом или обратном направлении. Схемы преобразователей с делителем напряже-

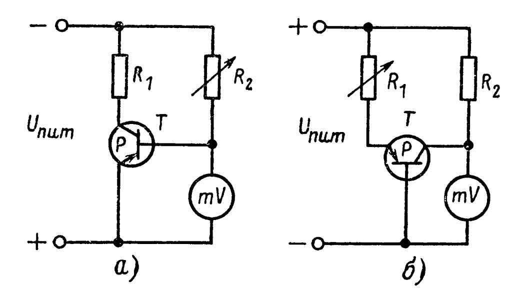


Рис 36. Схемы электроакустических преобразователей с тензотранзистором, одним источником питания и двумя резисторами.

а — тензотранзистор включен по схеме с общим эмиттером; *б* — тензотранзистор включен по схеме с общей базой.

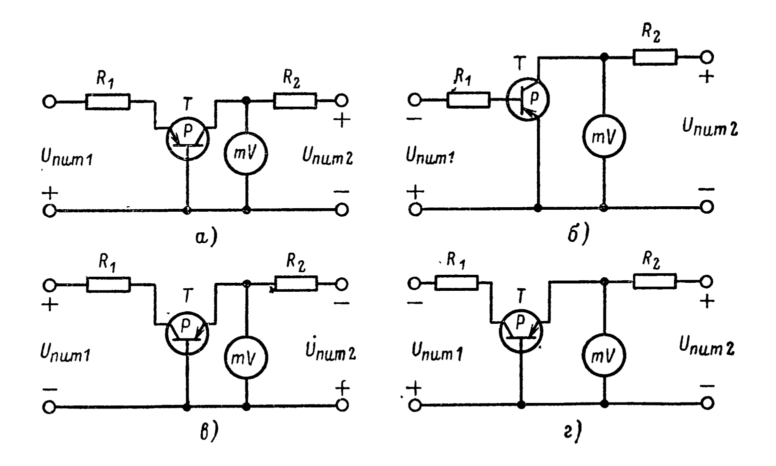


Рис. 37. Схемы электроакустических преобразователей с тензотранзистором, двумя резисторами и двумя источниками питания.

ния и транзистором, работающим в области прямых ветвей вольтамперной характеристики, изображены на рис. 36. Схемы с тензотранзистором, работающим в области обратных ветвей, представлены на рис. 37, *а—г*.

13. Электроакустические преобразователи на основе дифференциальных и мостовых схем

В электроакустических преобразователях в некоторых случаях возникает необходимость в измерении разности тензонапряжений или локальных давлений. Кроме того, в ряде случаев необходима высокая чувствительность в узком интервале изменений тензонапряжений или локальных давлений с возможностью регулировки и настройки на соответствующие диапазоны. Для этой цели применяют дифференциальные схемы включения.

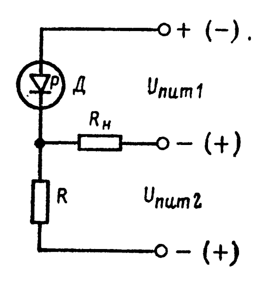


Рис. 38. Дифференциальная схема электроакустического преобразователя с тензодиодом и питанием от источников постоянного тока.

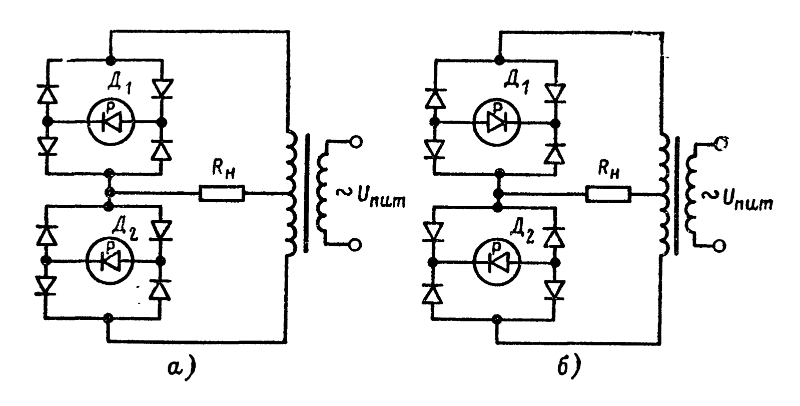


Рис. 39. Дифференциальные схемы электроакустических преобразователей с двумя тензодиодами и питанием от источников переменного тока.

а — тензодиоды смещены в прямом направлении; *б* — тензодиоды смещены в обратном направлении.

Особый интерес представляют дифференциальные схемы, в которых в качестве чувствительных элементов используются *p-n*-переходы электроакустических преобразователей. Расчет дифференциальных схем, содержащих нелинейные элементы, можно производить аналитически и графически.

На рис. 38 показана простейшая дифференциальная схема электроакустического преобразователя. Если резистор R заменить тензодиодом, смещенным в прямом направлении, то получим схему, по-

зволяющую измерять разность двух тензонапряжений. Измерение разности двух тензонапряжений или локальных давлений возможно также с помощью устройства, схема которого показана на рис. 39, *а*. Здесь в качестве чувствительных элементов использованы тензодиоды $Д_1$ и $Д_2$, которые включены в диагонали выпрямительных мостов в проводящем направлении относительно их выходных напряжений. При одинаковых тензонапряжениях или локальных давлениях напряжение на нагрузке равно нулю. При разнице тензонапряжений на нагрузке появляется падение напряжения, которое может быть зарегистрировано электроизмерительным прибором.

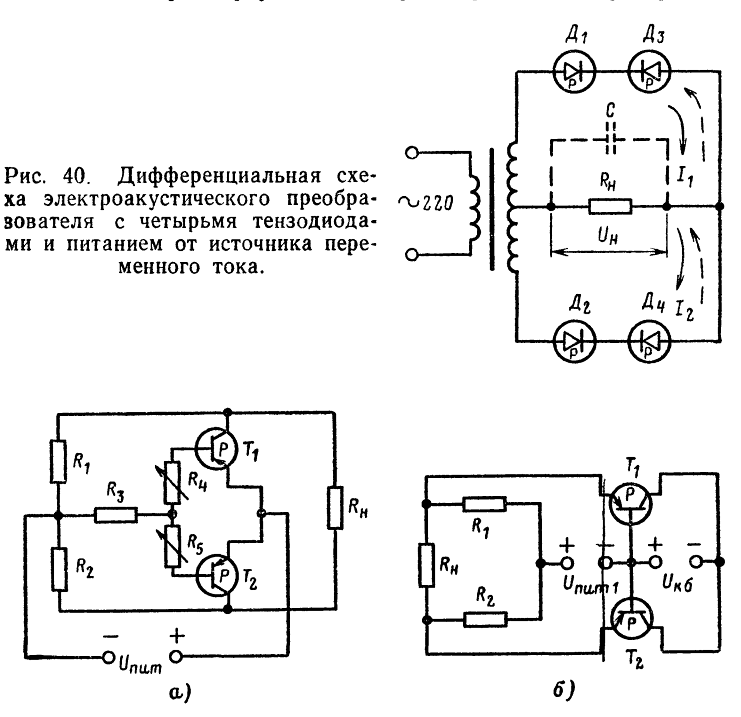


Рис. 40. Дифференциальная схема электроакустического преобразователя с четырьмя тензодиодами и питанием от источника переменного тока.

Рис. 41. Дифференциальные схемы электроакустических преобразователей с тензотранзисторами.

Измерение разности тензонапряжений можно осуществить с помощью преобразователя, схема которого представлена на рис. 39, *б*. Тензодиоды $Д_1$ и $Д_2$ смещены в обратном направлении относительно источников питания, которыми являются выпрямительные мосты. Нагрузка включена между средней точкой вторичной обмотки трансформатора, от которого производится питание схемы, и точкой соединения мостов.

Другое устройство для измерения разности тензонапряжений выполнено по дифференциальной схеме, в противоположных ветвях

которой расположены две пары встречно включенных тензодиодов (рис. 40). Тензодиоды $Д_1$ и $Д_3$ при этом подвержены воздействию тензонапряжения одной, а $Д_2$ и $Д_4$ — тензонапряжения другой полярности. Для сглаживания тока параллельно нагрузке включен конденсатор C.

Дифференциальные схемы акустических электропреобразователей с чувствительными элементами на основе тензотранзисторов

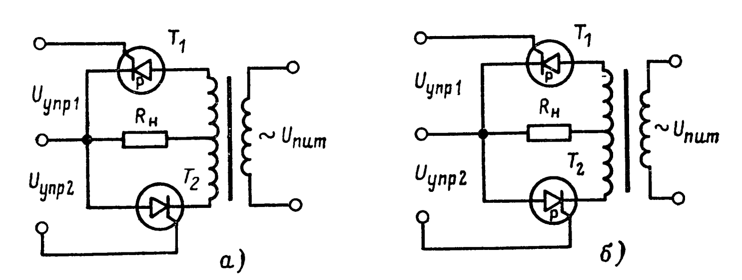


Рис. 42. Дифференциальные схемы электроакустических преобразователей с тензотиристорами.

а — с одним тензотиристором и тиристором; *б* — с двумя тензотиристорами.

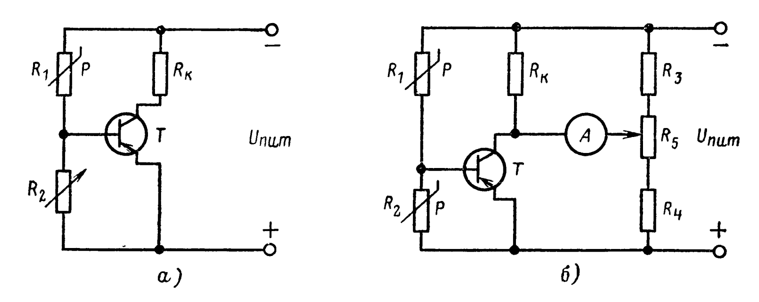


Рис. 43. Электроакустические усилители — преобразователи.

а — простейшая схема; *б* — мостовая схема.

представлены на рис. 41. На нагрузке $R_н$ (рис. 41, *а*) возникает напряжение, пропорциональное разности тензонапряжений, со знаком, определяемым относительным преобладанием одного из них. Изменяя сопротивление резисторов R_1, R_2 и R_3, можно изменять в широких пределах диапазон измеряемых тензонапряжений. Подстроечные резисторы R_4 и R_5 служат для компенсации разбалансировки схемы, возникающей за счет неидентичности характеристики тензотранзисторов и нестабильности их параметров во времени. Схема, показанная на рис. 41, *б*, отличается большей простотой по сравнению со схемой рис. 41, *а*, но требует два источника питания.

Дифференциальные схемы с тензотиристорами показаны на рис. 42. В одну из ветвей схемы, представленной на рис. 42, *а*, включен тензотиристор, а в другую ветвь — тиристор. Если вместо него

включить тензотиристор, то получим схему для измерения разности тензонапряжений (рис. 42, *б*).

Большой интерес для радиолюбителей могут представить электроакустические преобразователи, сочетающие в себе свойства измерительно-преобразовательные и усилительные. Схема одного из таких преобразователей представлена на рис. 43, *а*. Здесь один из резисторов делителя напряжения R_1 является тензочувствительным, а другой R_2 служит для регулировки и настройки на необходимый диапазон работы. Если два резистора этого делителя сделать тензочувствительными, то получим схему для измерения разности двух

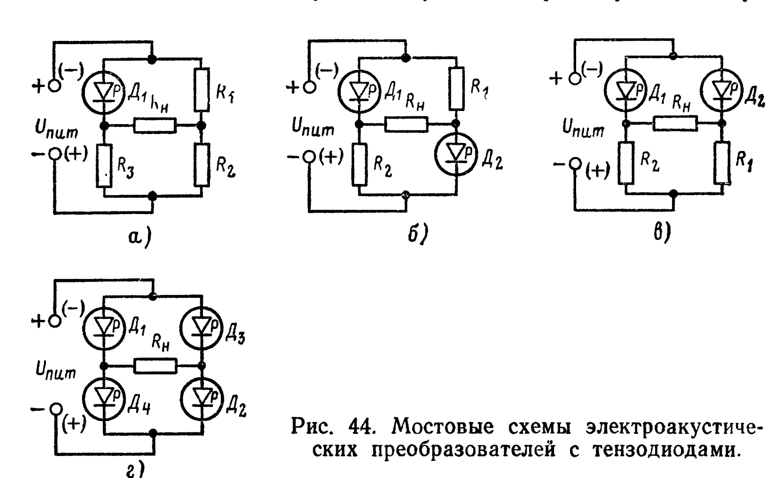


Рис. 44. Мостовые схемы электроакустических преобразователей с тензодиодами.

тензонапряжений или локальных давлений с одновременным усилением сигнала транзистором *Т*. Мостовая схема электроакустического преобразователя, в которой одновременно усиливается сигнал, изображена на рис. 43, *б*. При этом хорошие результаты могут быть получены, если биполярный транзистор *Т* заменить на полевой.

Наибольшее применение в электроакустических преобразователях нашли мостовые измерительные схемы. Мостовая схема включения смещенного в прямом направлении тензодиода представлена на рис. 44, *а*. Здесь в одно плечо моста включен тензодиод $Д_1$, а в три других — резисторы R_1, R_2, R_3. Примерно в 2 раза бо́льшую чувствительность имеет схема, представленная на рис. 44, *б*, в два противоположных плеча которой включены тензодиоды $Д_1$ и $Д_2$, а в два других — резисторы R_1 и R_2. Включив в два смежных плеча по тензодиоду, получим схему для измерения разности тензонапряжения (рис. 44, *в*). Заменив резисторы тензодиодами, получим устройство для измерения разности тензонапряжений повышенной чувствительности (рис. 44, *г*). При этом тензодиоды $Д_1$ и $Д_2$ подвергаются воздействию тензонапряжения одной, а $Д_3$ и $Д_4$ — другой полярности. Все эти схемы могут быть применены и для тензодиода, смещенного в обратном направлении, однако в этом случае необходимо изменить на противоположную полярность внешнего источника питания.

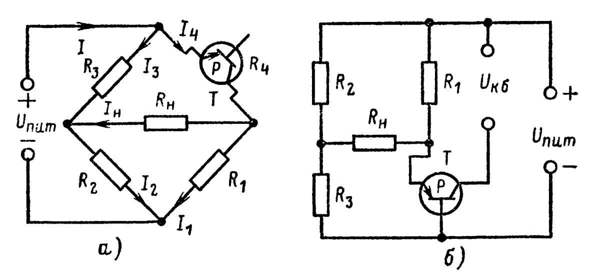


Рис. 45. Мостовые схемы электроакустических преобразователей с тензотранзисторами.

Мостовые схемы электроакустических преобразователей с тензотранзисторами представлены на рис. 45. Чувствительность, большую, чем в мостовых схемах с тензодиодами, можно получить при включении в одно плечо моста коллекторно-эмиттерного (рис. 45, *а*) или эмиттерно-базового (рис. 45, *б*) перехода тензотранзистора. По аналогии с тензодиодами тензотранзисторы также могут быть включены в два, три или четыре плеча мостовых измерительно-преобразовательных схем.

14. Электроакустические преобразователи на основе импульсных генераторов

С разработкой полупроводниковых электроакустических преобразователей появилась возможность использования датчиков механических деформаций в схемах дистанционной передачи информации, когда амплитудные параметры электрического сигнала не обеспечивают необходимой точности. Большая точность при этом может быть обеспечена путем преобразования тех или иных физических величин в частоту и длительность импульсов. В этом смысле представляет интерес включение полупроводниковых тензоэлементов во времязадающие цепочки таких устройств, как блокинг-генераторы, самовозбуждающиеся мультивибраторы, одновибраторы, фантастроны и т. д. Достаточно высокая чувствительность полупроводниковых тензоэлементов к воздействиям механических деформаций, перемещений, усилий, давлений позволяет получить хорошую точность преобразования упомянутых устройств, а также устройств, где изменение напряжения на тензодатчике, возникающее под действием механической деформации, используется для частотной модуляции генератора высокой частоты телеметрической системы, выполненной, например, с использованием варакторов. Преобразование тензонапряжения или локального давления в частоту синусоидальных сигналов, длительность или частоту следования импульсов не только повышает точность, но и облегчает задачу представления преобразуемой величины в двоичном коде. Иногда может представлять интерес дистанционная передача данных о тензонапряжении с помощью радиосигналов.

Преобразователь тензонапряжения или локального давления в частоту может быть построен на блокинг-генераторе. На рис. 46 по-

казана схема блокинг-генератора, частота следования импульсов на его выходе зависит от сопротивления резистора $R_б$, влияющего на время восстановления схемы. Сделав этот резистор тензочувствительным, используя, например, тензодиод, смещенный в обратном направлении, можно получить преобразователь типа «изменение тензонапряжения — изменение частоты». Вместо тензодиода могут быть использованы коллекторно-эмиттерный и базово-эмиттерный переходы тензотранзистора, а также другие тензочувствительные элементы.

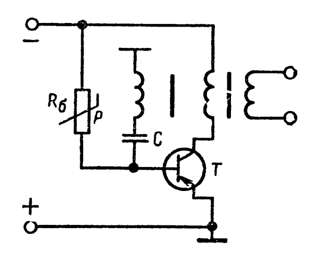


Рис. 46. Схема блокинг-генератора с тензорезистором.

Лучшую стабильность частоты по сравнению с блокинг-генератором имеют мультивибраторы. Наиболее стабильным устройством является мультивибратор с положительным смещением на сетке, в разрядные цепи которого включены тензочувствительные элементы. Преимуществом подобного устройства является легкость изготовления и простота настройки, чем, в частности, и определяется их широкое распространение Как известно, частоты генерации мультивибратора обратно пропорциональна сумме постоянных времени двух разрядных цепочек:

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2},$$

где t_1 и t_2 — постоянные времени разрядных цепочек.

При использовании в качестве резисторов R_1 и R_2 тензочувствительных элементов частота f будет являться функцией тензонапряжения, воздействующего на чувствительные элементы. Следовательно, частота генерации также будет являться функцией тензонапряжения или локального давления. В качестве тензочувствительных элементов могут быть использованы, например, тензодиоды, включенные в обратном направлении. Мультивибраторы могут быть собраны как на транзисторах (рис. 47, *а*), так и на электронных лампах (рис. 47, *б*). Использование электронных ламп вместо транзисторов вызвано тем, что это позволяет уменьшить влияние окружающей среды на параметры схемы.

Представляет интерес также преобразователь тензонапряжения в частоту, построенный на основе тиристорного генератора пилообразных импульсов и тензодиода с использованием обратной ветви его вольт-амперной характеристики (рис. 48, *а*). Частота генерации зависит от постоянной времени цепей как заряда, так и разряда конденсатора, которая является при постоянной емкости конденсатора функцией сопротивления резистора цепи разряда. Так как в данном случае в цепи разряда находится тензодиод, включенный в обратном направлении то сопротивление цепи разряда фактически определяется обратным сопротивлением тензодиода. Следовательно, частота следования импульсов будет зависеть от тензонапряжения или локального давления. Наличие у тиристора управляющего электрода позволяет производить плавную настройку

устройства на заданную частоту генерации импульсов за счет изменения напряжения переключения тиристора.

В цепь разряда конденсатора подобного тиристорного генератора в качестве тензочувствительного элемента может быть включен тензотранзистор (рис. 48, *б*). Это позволяет получить частоту генерации, являющейся функцией тензонапряжения. Кроме того, изменяя напряжение смещения $U_{бэ}$, можно производить плавную регу-

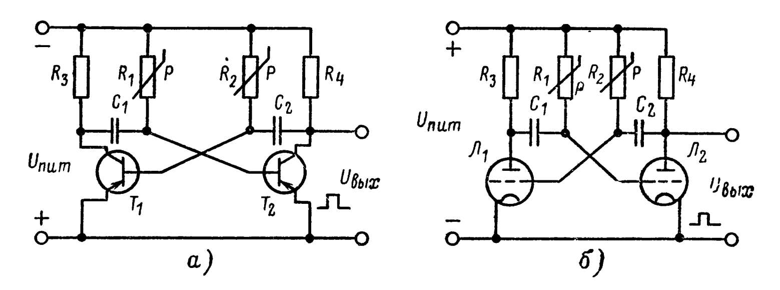


Рис. 47. Схемы мультивибраторов с тензорезисторами в разрядных цепях.

а — на транзисторах; *б* — на электронных лампах.

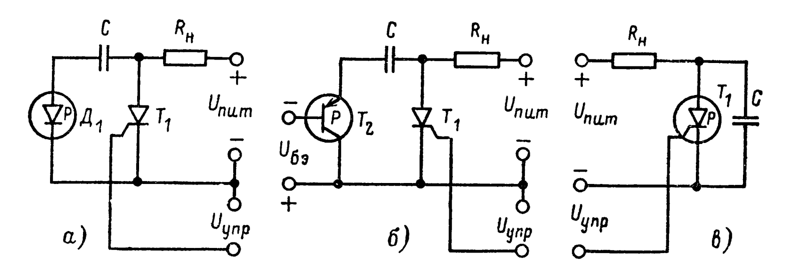


Рис. 48. Схемы электроакустических преобразователей изменения давления или тензонапряжения в изменение частоты следования импульсов.

а — с тензодиодом; *б* — с тензотранзистором; *в* — с тензотиристором.

лировку частоты генерации. Применение в качестве тензочувствительного элемента тензотранзистора вместо тензодиода значительно повышает тензочувствительность и одновременно создает возможность настройки на определенный диапазон генерации.

В схеме преобразователя, изображенной на рис. 48, *в*, тензочувствительным элементом является тиристор, что позволяет несколько упростить схему по сравнению с предыдущими. При изменении тензонапряжения или локального давления изменяется напряжение переключения тензотиристора, что влечет за собой изменение момента открывания и закрывания тензотиристора. Таким образом, частота генерации будет являться функцией тензонапряжения. Настройка

устройства производится при помощи управляющего электрода тензотиристора.

Схема электроакустического преобразователя изменения тензонапряжения или локального давления в частоту показана на рис. 48, *в*. Тензотиристор T изготовлен на базе тиристора типа 2У101Г. Для работы схемы необходимо, чтобы напряжение источника питания было больше напряжения переключения тензотиристора. В исходном состоянии тензотиристор T закрыт, и конденсатор C заряжается от источника $U_{пит}$. После достижения на тензотиристоре напряжения, равного напряжению переключения, конденсатор

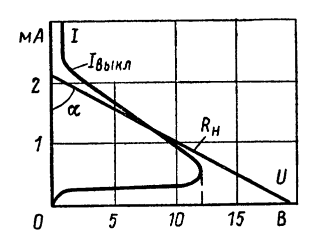


Рис. 49. График к расчету схемы электроакустического преобразователя изменений локального давления в изменение частоты.

разряжается через тензотиристор и ограничительный резистор R до тех пор, пока ток, протекающий через тензотиристор, не станет меньше тока выключения. После этого тензотиристор снова вернется в исходное состояние. Вторым условием, необходимым для работы схемы, является наличие общей точки у линии нагрузки $R_н$ и вольтамперной характеристики тензотиристора. Таким образом, для определения сопротивления резистора $R_н$ нужно знать вольт-амперную характеристику тензотиристора при тензонапряжении, на котором производится настройка схемы (в том числе и для отсутствия тензонапряжения), и заданном токе в управляющем электроде. Кроме того, необходимо знать напряжение питания $U_{пит}$. Тогда, проведя нагрузочную линию до пересечения с вольт-амперной характеристикой тензотиристора (рис. 49) на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением, можно определить сопротивления резистора $R_н$ по формуле

$$R_н = \operatorname{arctg} \alpha.$$

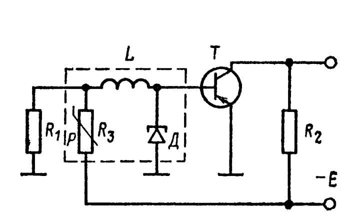
Частоту следования импульсов f определяют по формулам:

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2};$$

$$t_1 = RC \ln \frac{U_{пит} - U_{пер}}{U_{пит}};$$

$$t_2 = R_н C \ln \frac{I_{выкл}(R + R_н) - U_{пит}}{U_{пер} \frac{R + R_н}{R} - U_{пит}}.$$

Электроакустический преобразователь может быть построен на основе тензоварикапа, включенного в LC-контур генератора радиочастоты. При этом появляется возможность одновременного преобразования тензонапряжения или локального давления в радиочастотный сигнал. Температурная нестабильность емкости тензоварикапа невелика и приближается к нестабильности керамических конденсаторов. Барьерная емкость тензоварикапа зависит от тензонапряжения или локального давления. Чувствительность схемы значительно увеличивается, если управляющий сигнал на LC-контур подавать с тензочувствительного делителя напряжения.



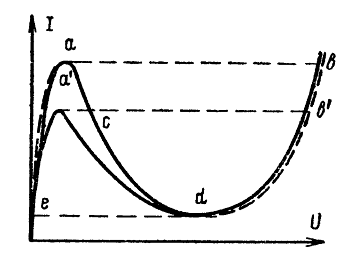


Рис. 50. Схема релаксационного генератора на туннельном диоде.

Рис. 51. К выбору рабочей точки электроакустического преобразователя (релаксационного генератора на туннельном диоде).

Как уже указывалось, давление, приложенное к туннельному диоду, вызывает изменение его вольт-амперной характеристики. Это изменение зависит от материала туннельного диода и минимально для кремния; причем оно возрастает в следующем порядке: германий, галлий-мышьяк, галлий-сурьма. Особенно сильно давление воздействует на участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Для преобразователя, выполненного на основе отечественного туннельного диода с током максимума 16,3 мА (в атмосферном давлении), при измерении в чистом глицериновом масле оказалось, что чувствительность по току в точке максимума вольт-амперной характеристики равна $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ мкА/Па и, следовательно, нецелесообразно использовать изменение тока под действием давления в качестве выходного параметра преобразователя. Более высокую чувствительность к изменению давления можно получить, беря в качестве выходного параметра напряжение или статическое сопротивление. Максимальная чувствительность при изменении напряжения равна $106{,}6 \cdot 10^{-5}$ мВ/Па. Зависимость приращения напряжения от давления нелинейна.

Электроакустический релаксационный генератор, использующий в качестве чувствительного элемента туннельный диод, имеет линейную зависимость между частотой и давлением на туннельный диод. Электрическая схема наиболее простого релаксационного генерато-

ра на туннельном диоде приведена на рис. 50. Генератор выполнен на туннельном диоде *Д*, катушке индуктивности *L*, резисторе R_1 и тензорезисторе R_3. Каскад на транзисторе *T* и резисторе R_2 предназначен для усиления генерируемых импульсов. Нагрузочная линия пересекает вольт-амперную характеристику туннельного диода на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением *T* (точка *C* на рис. 51). Сопротивление катушки индуктивности *L* выбирают таким образом, чтобы генерация носила не синусоидальный, а релаксационный характер. Рабочая точка туннельного диода при этом описывает траекторию, показанную на рис. 51 штриховой линией. Вся траектория движения рабочей точки может быть разбита на четыре участка: *ab*, *bd*, *de* и *ea*. На перемещение рабочей точки по участкам *ab* и *de* необходимо ничтожно малое время. Основное время затрачивается на прохождение рабочей точки по участкам *bd*, когда формируется импульс на выходе генератора, и *ea*, когда формируется пауза между импульсами. Уменьшение максимального тока туннельного диода под действием давления, приложенного к его *p-n*-переходу, приводит к уменьшению участков *ea* и *bd*. Новая траектория $a'b'de$ также содержит четыре участка: $a'b'$, $b'd$, de и ea'. При этом $ab=a'b'$, de остается без изменения, а $b'd<bd$ и $ea'<ea$. Это приводит к уменьшению длительности импульса и паузы, а следовательно, к увеличению частоты. Для рассматриваемой схемы имеет место линейная зависимость частоты от давления. Линейность сохраняется в диапазоне давлений, в котором существует линейная зависимость максимального тока от давления, а последняя сохраняется до давления 3000 МПа.

Отклонение линейности для германиевых туннельных диодов при давлении, равном 200 МПа, не превышает +1,5% [14]. При использовании туннельного диода с максимальным током 30 мА и индуктивностью 5,4 мкГ чувствительность устройства для регистрации давления составляет $5{,}2\cdot10^{-3}$ Гц/Па При атмосферном давлении частота генерируемых импульсов равна 1 МГц. Количество импульсов определяется счетчиковым частотомером. Экспериментально установлено, что большую чувствительность к давлению имеют туннельные диоды с большим максимальным током.

При использовании в релаксационном генераторе туннельного диода следует правильно выбирать смещение на нем. На рис. 52 приведены зависимости частоты релаксационного генератора от падения напряжения на резисторе R_1 (рис. 50). Кривые *1* и *3* относятся к схеме без тензорезистора R_3, а кривые *2* и *4* — к схеме, изображенной на рис. 50. Значения индуктивности катушки *L* для этих случаев равны 6 и 9,4 мкГ. Каждая кривая имеет максимум. С целью получения наибольшей стабильности работы при высокой чувствительности падение напряжения на резисторе R_3 должно соответствовать максимуму этой характеристики. При таком смещении туннельного диода и частоте генерации 60 кГц среднеквадратическое отклонение в диапазоне 0,1—200 МПа не превышает 200—300 Гц, что свидетельствует о хорошей стабильности устройства. Улучшение качества туннельных диодов в процессе совершенствования технологии их производства приведет к еще большему повышению стабильности работы подобного типа устройств.

Для измерения очень малых давлений необходимо увеличение чувствительности устройства в целом. При применении генераторов релаксационных колебаний может быть получена чувствительность 0,5—1 кГц/Па. Для получения такой высокой чувствительности в ка-

честве тензочувствительных элементов электроакустических преобразователей необходимо использовать одновременно несколько элементов схемы (элементы, которые могут служить для этой цели, обведены на рис. 50 пунктиром). Основной электроакустический преобразователь выполнен на туннельном диоде, максимальный ток которого уменьшается с увеличением механического воздействия на него. В связи с этим частота импульсов на выходе генератора увеличивается. В качестве второго чувствительного элемента используется катушка индуктивности, выполненная на ферритовом сердечнике. При всестороннем сжатии ферритового сердечника его магнитная проницаемость уменьшается, что приводит к уменьшению индуктивности. Третьим чувствительным элементом в данном случае может являться полупроводниковый тензорезистор R_3, который включают между генератором на туннельном диоде и источником питания. Если в исходном состоянии режим работы генератора описывается точкой A (рис. 52), то приложение механического воздействия на тензорезистор R_3 приводит к увеличению падения напряжения на резисторе R_2 и, следовательно, к увеличению частоты.

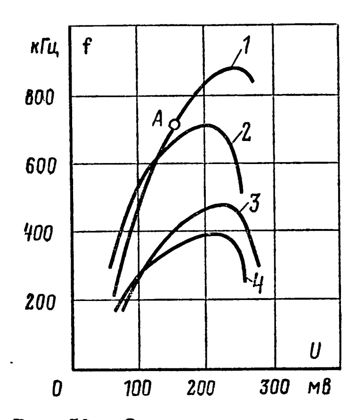


Рис. 52. Зависимость частоты релаксационного генератора на туннельном диоде от падения напряжения на резисторе.

Из вышеизложенного следует, что одновременное механическое воздействие на тензорезистор, катушку индуктивности и туннельный диод приводит к увеличению частоты. При этом каждый элемент вносит свой вклад: тензорезистор — путем уменьшения своего сопротивления, катушка индуктивности — путем уменьшения индуктивности L, а туннельный диод — путем уменьшения тока максимума.

Рассмотренная схема является генератором и выполнена без усиления сигнала. Для усиления импульсов применяют усилитель на транзисторе. Кроме того, включение транзистора несколько сокращает время, необходимое для прохождения рабочей точки по диффузионной ветви вольт-амперной характеристики. Для повышения чувствительности электроакустического преобразователя к механическому воздействию целесообразно это время еще уменьшить. Это может быть выполнено в релаксационном генераторе на туннельных диодах $Д_1$ и $Д_2$ и транзисторе T, показанном на рис. 53. Ток в цепи R, L, $Д_1$, $Д_2$, T экспоненциально возрастает. В тот момент, когда его значение становится равным току максимума, туннельный диод переключается в состояние высокого напряжения, после чего транзистор T открывается и туннельный диод переключается в состояние низкого напряжения. Это приводит к закрыванию транзистора T и ток через туннельный диод начинает снова экспоненциально возрастать.

Устройство для регистрации механических воздействий с преобразователем на туннельном диоде, отличающееся большой мощно-

стью, представлено на рис. 54. Для получения большой выходной мощности могут быть использованы транзисторы средней и большой мощности типа П601. Туннельный диод в данном случае включают в цепь базы мощного транзистора, а катушку индуктивности — в цепь базы или цепь эмиттера. Генерация импульсов осуществляется цепью, составленной из туннельного диода *Д*, резистора R_2, катушки индуктивности L и *p-n*-перехода база — эмиттер транзистора.

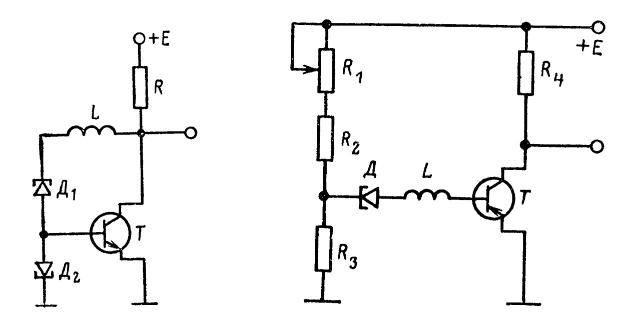


Рис. 53. Схема релаксационного генератора на туннельном диоде и транзисторе.

Рис. 54. Схема электроакустического устройства для регистрации механических воздействий с преобразователем на туннельном диоде.

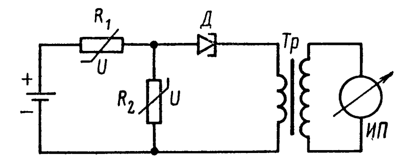


Рис. 55. Электроакустический преобразователь на туннельном диоде с тензоваристором.

При механическом воздействии на туннельный диод частота генерации устройства увеличивается.

Необходимо отметить, что на работу рассмотренных устройств оказывают влияние изменения условий окружающей среды, особенно температуры.

Приведенные ранее значения чувствительности, нелинейности и среднеквадратического отклонения получены для температуры $+20 \pm 3°$ C.

Электрическая схема преобразователя с тензоваристором показана на рис. 55. Во вторичную обмотку трансформатора включены регистрирующий прибор или любая другая нагрузка. Рассматриваемая схема позволяет повысить чувствительность, расширить диапазон рабочих температур и в случае необходимости уменьшить зависимость выходного сигнала от радиации. Это достигается тем, что в электроакустическом преобразователе тензоэлементы выполнены на

основе варисторов, образующих с источником питания E последовательную замкнутую цепочку. Параллельно одному из тензоэлементов подключены последовательно соединенные первичная обмотка трансформатора *Тр* и туннельный диод *Д*. Генерация сигнала достигается за счет туннельного диода, рабочая точка которого при нормальной работе смещается в область вольт-амперной характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Смещение рабочей точки производится варистором R_2.

15. Электроакустические преобразователи на основе переключающих схем

Значительное место среди электроакустических преобразователей занимают сигнализаторы релейного действия, т. е. переключающие устройства, сигнализирующие о достижении какого-либо определенного значения тензонапряжения или локального давления, а

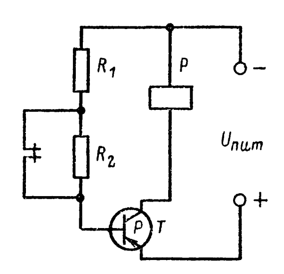


Рис. 56. Схема контактного электроакустического релейного преобразователя на тензотранзисторе.

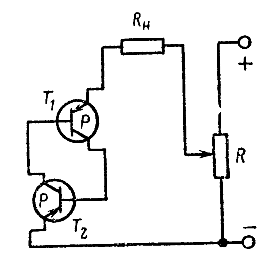


Рис. 57. Схема бесконтактного электроакустического релейного преобразователя на двух тензотранзисторах.

также производящие соответствующие переключения исполнительных устройств преобразователей.

Применение полупроводниковых приборов в электроакустических преобразователях позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с преобразователями других типов, для которых характерны трудности регулировки и настройки, неудобства практической реализации схем и их расчета, узкая область применения, недостаточно высокая точность, воспроизводимость и стабильность. При использовании в переключающих схемах полупроводниковых приборов в качестве тензочувствительных элементов последние в ряде случаев сочетают в себе целый ряд функций, в том числе переключающие и исполнительные. Использование в качестве чувствительного элемента полупроводникового прибора с управляющим электродом дает возможность регулировки и настройки на соответствующее значение тензонапряжения или локального давления.

Тензозависимость тока коллектора позволяет использовать транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером, в качестве чувствительного элемента тензореле. В схеме, изображенной на рис. 56,

исполнительное реле включено в цепь коллектора, а в цепь базы включены резисторы R_1 и R_2, один из которых шунтируется размыкающим контактом исполнительного реле. Изменяя сопротивления резисторов R_1 и R_2, можно настраивать реле на заданные значения тензонапряжений или локальных давлений срабатывания.

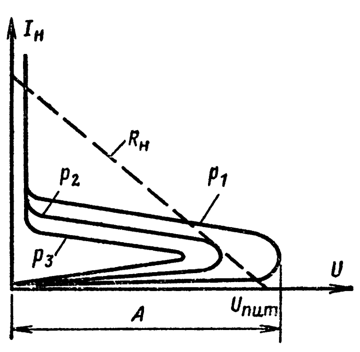


Рис. 58. К пояснению принципа действия бесконтактного электроакустического релейного преобразователя.

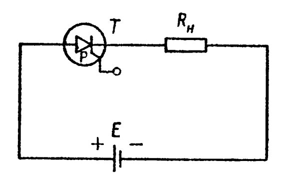


Рис. 59. Схема бесконтактного электроакустического релейного преобразователя на основе тензотиристора.

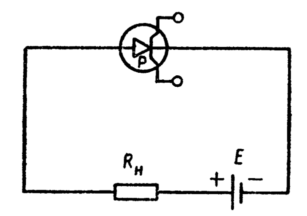


Рис. 60. Схема бесконтактного электроакустического релейного преобразователя на основе тензобинистора.

На двух транзисторах (рис. 57) может быть построено бесконтактное тензочувствительное реле, так как такая схема позволяет получать релейный режим тока в нагрузке. Такое реле состоит из двух транзисторов, включенных по модели четырехслойной структуры, источника питания и нагрузки. Принцип работы преобразователя с релейной статической характеристикой ясен из рис. 58, где представлены вольт-амперные характеристики тензоэлемента из двух тензотранзисторов для локальных давлений P_1, P_2 и P_3 и нагрузочная линия $R_н$. При изменении локального давления от P_1 до P_2 ток в нагрузке изменяется скачком. Настройка релейного электроакустического преобразователя на заданное давление срабатывания производится изменением напряжения питания или сопротивления нагрузки.

Работа электроакустических преобразователей на четырехслойной структуре основана на релейной зависимости тока в нагрузке от тензонапряжения или локального давления. Исследования тензоти-

ристоров показали значительную зависимость напряжения переключения от локального давления и позволили использовать их в тензорелейных схемах. Применение четырехслойных структур в качестве тензочувствительных элементов дает возможность на их основе строить бесконтактные электроакустические преобразователи с релейной характеристикой. Схемы подобного преобразователя представлены на рис. 59 и 60. Бесконтактный преобразователь состоит из тензотиристора (или тензобинистора), источника постоянного напряжения и нагрузки. Использование многослойных структур с управляющим электродом в качестве тензочувствительных элементов позволяет производить плавную настройку на соответствующий

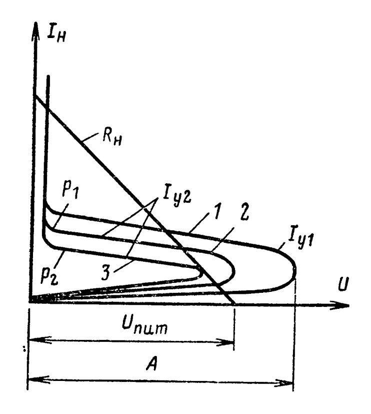


Рис. 61. К пояснению принципа действия схемы на основе тензотиристора.

диапазон тензонапряжений. Принцип работы электроакустического преобразователя на основе тензотиристора рассмотрен на рис. 61, где представлены вольт-амперные характеристики тензотиристора и нагрузочная линия $R_н$. При этом кривые *1* и *2* соответствуют двум различным сигналам на управляющем электроде тензотиристора при давлении P_1. Давлению P_2 соответствует вольт-амперная характеристика *3*. При изменении давления от P_1 до P_2 ток в нагрузке изменяется скачком. Настройка преобразователя на соответствующее тензонапряжение или давление срабатывания может производиться при помощи управляющего электрода тензотиристора. Применение четырехслойной структуры с двумя управляющими электродами (тензобинистора) в качестве тензочувствительного элемента значительно расширяет возможности применения подобного типа преобразователей.

Для рассмотренных схем характерно то, что тензочувствительный элемент представляет собой одновременно релейное исполнительное устройство с электрически независимой цепью управления, что позволяет не только упростить схему, но и применить ее в широком диапазоне изменения тензонапряжений или локальных давлений с обеспечением взаимозаменяемости в устройствах различного назначения.

Глава четвертая

РАСЧЕТ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

16. Основы расчета

При создании полупроводникового электроакустического преобразователя проводят расчет его ожидаемых характеристик, основными из которых являются функция преобразования неэлектрического параметра в электрический, чувствительность, собственная частота колебаний, выходной сигнал и выходная мощность. Для расчета большинства вышеперечисленных характеристик необходимо знать эквивалентную жесткость или обратную ей податливость механической и электромеханической схемы преобразователя. Поскольку электроакустический преобразователь может обладать свойством анизотропности, расчет эквивалентной жесткости необходимо вести в направлении воздействия неэлектрического параметра.

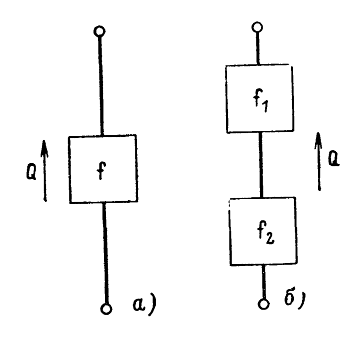


Рис. 62. Ветвь электроакустической системы.

а — из одного упругого элемента; *б* — из двух последовательно соединенных упругих элементов.

Электроакустическая система в общем случае может содержать любое число упругих элементов, соединенных последовательно, параллельно или смешанным образом. Разветвленная схема содержит несколько ветвей и узлов, причем ветвь образуется одним или несколькими последовательно соединенными упругими элементами, испытывающими одно и то же усилие. На рис. 62, *а* показана ветвь, состоящая из одного упругого элемента. На рис. 62, *б* показана ветвь из двух упругих элементов, обладающих податливостями f_1 и f_2 и испытывающих воздействие усилия Q.

Соединение трех или большего числа ветвей происходит в узле. Линии, связывающие ветви в схеме, представляют собой жесткие соединения (рис. 63).

Параллельным соединением элементов механической цепи или ветвей является такое соединение, при котором все элементы или ветви присоединяются к одной паре узлов (рис. 64), причем любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, образует контур.

На практике встречаются простейшие одноконтурные и сложные многоконтурные полупроводниковые электроакустические преобразователи. Наиболее известный путь расчета электроакустических систем заключается в их преобразовании к простейшему виду. При таких преобразованиях пользуются свойствами соединения упругих элементов в механических системах.

Эквивалентная податливость цепи, состоящей из последовательно соединенных упругих элементов, равна сумме податливостей этих упругих элементов. Аналогично эквивалентная жесткость упругих элементов, соединенных параллельно, равна сумме жесткостей всех

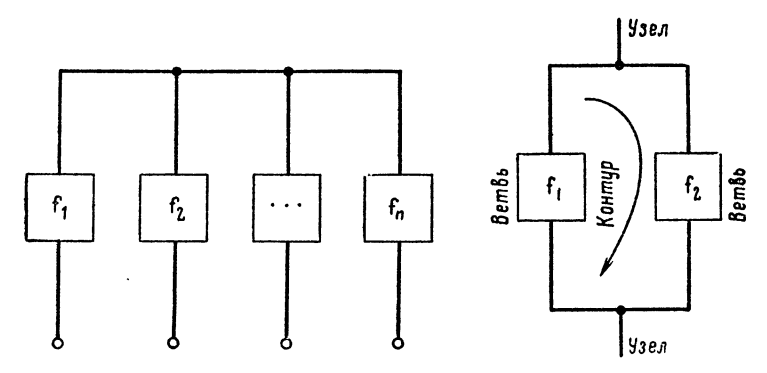


Рис. 63. Соединение упругих элементов в узел.

Рис. 64. Параллельное соединение упругих элементов в контур.

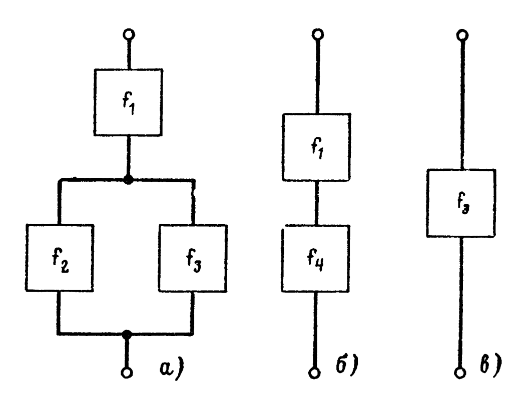


Рис. 65. Последовательно-параллельное соединение упругих элементов.

а — соединение трех упругих элементов; *б* — соединение двух упругих элементов; *в* — эквивалентный упругий элемент.

параллельных ветвей. На рис. 65 показана последовательность преобразований последовательно-параллельного соединения упругих элементов f_1, f_2 и f_3. В схеме на рис. 65, *а* два параллельных упругих элемента f_2 и f_3 соединены последовательно с упругим элементом f_1. С целью упрощения схемы два параллельно соединенных упругих элемента f_2 и f_3 заменяются одним эквивалентным упругим элементом f_4, жесткость которого равна сумме жесткостей упругих элемен-

тов f_2 и f_3. После первого преобразования получаем схему, показанную на рис. 65, *б*. Эта схема представляет собой последовательное соединение двух упругих элементов f_1 и f_4. Второе преобразование заключается в замене двух последовательно соединенных упругих элементов f_1 и f_4 одним упругим элементом с эквивалентной податливостью, равной сумме податливостей упругих элементов f_1 и f_4. Наконец, получаем простейшую схему, показанную на рис. 65, *в*.

Найденная эквивалентная жесткость или податливость упругой системы позволяет определить абсолютную деформацию или перемещение точки приложения силы под действием этой силы. Перемещение подсчитывается как произведение силы на податливость. Механические напряжения связаны с деформацией через модуль упругости материала упругого элемента.

Акустическое давление преобразовывается в усилие через эффективную площадь. Значение возникающего усилия равно произведению акустического давления на эффективную площадь воспринимающей давление мембраны.

Знание функции преобразования неэлектрического параметра (усилия, механического напряжения, деформации) в изменение электрического параметра позволяет определить выходной сигнал и общую чувствительность системы.

Для вычисления частоты собственных колебаний электроакустической системы по общепринятым зависимостям необходимо знать массу и жесткость колебательной системы. Масса может быть либо подсчитана, либо определена экспериментально. Жесткость в направлении действия силы подсчитывается вышеописанным путем либо определяется экспериментально. Поскольку экспериментальный путь определения эквивалентной жесткости колебательной системы в любительских условиях чрезвычайно сложен, пользуются расчетным путем. Для проведения расчета необходимо знать жесткость элементарных упругих элементов, входящих в колебательную систему. Элементарными упругими элементами являются мембраны, диафрагмы, иглы, балки, штоки, элементы крепления и соединения, корпус, электроакустический преобразовательный элемент. Последний может быть представлен полупроводниковыми тензорезисторами либо элементами с *p-n*-переходами. Если в электроакустическом преобразователе используются клеевые соединения, их необходимо учитывать при расчете эквивалентной жесткости и частоты собственных колебаний системы. В противном случае при определении указанных величин можно ошибиться в 1,5—2 раза. Расчет жесткостей и податливостей элементарных упругих элементов ведется по методам сопромата и технической механики.

Расчет электрических параметров схемы ведется по законам электротехники с использованием известных методов расчета электронных и полупроводниковых цепей и схем [15].

17. Основные характеристики

Чувствительные элементы полупроводниковых электроакустических преобразователей, как указывалось выше, могут быть как беспереходные, так и с *p-n*-переходами. В зависимости от этого и различают основные характеристики, свойственные каждому из этих типов. Основные параметры беспереходных чувствительных элементов даются в паспортах на тензорезисторы. Чувствительные эле-

менты с p-n-переходами стали применяться в электроакустических преобразователях сравнительно недавно, и поэтому для них еще нет единой принятой системы параметров. Однако уже сейчас можно говорить о некоторых основных параметрах и основных характеристиках этих тензоэлементов. По мере расширения применения таких тензоэлементов параметры для каждого из них будут отработаны и окончательно утверждены при переходе к серийному производству.

Рассмотрим основные параметры полупроводниковых тензорезисторов.

1. Номинальным сопротивлением тензорезистора называют его сопротивление без деформации при фиксированной температуре окружающей среды, равной, например, 20° С. Обычно оно составляет от нескольких десятков до нескольких тысяч ом.

2. Допустимой температурой $T_{доп}$ называют температуру, при превышении которой возникают необратимые явления в полупроводниковом тензорезисторе. Она определяется свойствами рабочего тела тензорезистора, конструкцией, выводами, материалом припоя. В большинстве случаев допустимая температура обусловлена температурой плавления контакта металл — полупроводник (если контакты припаяны оловом, то $T_{доп}=220°$ С).

3. Температурным коэффициентом сопротивления полупроводникового тензорезистора (ТКС) называют выраженное в процентах изменение сопротивления (по абсолютной величине) при изменении температуры на 1° С.

Эта величина меняется с температурой, так как зависимость сопротивления тензорезистора от температуры нелинейна. В связи с применением для изготовления тензорезисторов материалов с малым и с большим удельным сопротивлением значение ТКС полупроводниковых тензорезисторов колеблется в пределах 0,1—0,8%/°С, а знак ТКС может быть положительным или отрицательным.

4. Коэффициентом тензочувствительности K называют отношение относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины тензорезистора:

$$K = (\Delta R/R)/(\Delta l/l),$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления тензорезистора; $\Delta l/l$ — относительное изменение длины тензорезистора.

Если рассматривать полупроводниковый тензорезистор как однородное по удельному сопротивлению тело постоянного сечения, то для него выполняется соотношение

$$R = \rho_0 \, l/s,$$

где s — площадь поперечного сечения тензорезистора; ρ_0 — удельное сопротивление тензорезистора.

В связи с нелинейностью деформационных характеристик тензорезисторов (под деформационной характеристикой понимают зависимость относительного изменения сопротивления тензорезистора от относительной деформации) коэффициент тензочувствительности зависит от относительной деформации.

5. Предельной деформацией $\varepsilon_{пред}$ называют деформацию, при которой тензорезистор выходит из строя. Она зависит от площади поперечного сечения полупроводникового стержня, а также от его обработки. При малой площади поперечного сечения (0,3 мм^2) предельная относительная деформация может достигать 10^{-2}.

Вольт-амперные характеристики чувствительных элементов электроакустических преобразователей являются одними из основных характеристик, и рассмотрение их семейств позволяет выявить возможности применения полупроводниковых приборов в различных схемах преобразователей. Кроме того, на основании вольт-амперных характеристик могут быть построены и другие статические характеристики чувствительных элементов.

Рассмотрим сначала вольт-амперные характеристики тензорезисторов, изготовленных на основе германиевой монокристаллической ленты. Статические характеристики беспереходных чувствительных

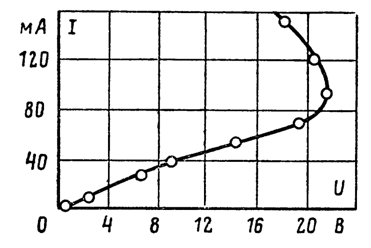


Рис. 66. Вольт-амперная характеристика германиевого чувствительного элемента электроакустического преобразователя.

Рис. 67. Температурная характеристика германиевого тензорезистора.

элементов электроакустических преобразователей, изготовленных на основе других полупроводниковых материалов, во многом аналогичны германиевым тензорезисторам.

Вольт-амперная характеристика германиевого чувствительного элемента электроакустического преобразователя представлена на рис. 66. Так как при прохождении тока через полупроводниковый элемент в нем выделяется тепло, то каждой точке вольт-амперной характеристики соответствует определенная температура рабочего тела тензорезистора. Вид вольт-амперной характеристики тензоэлемента определяется его температурной характеристикой. Температурной характеристикой чувствительного элемента называют зависимость статического сопротивления, измеренного при отсутствии механических деформаций и токе, не вызывающем разогрева тела, от температуры.

Полупроводниковые тензочувствительные элементы могут изготавливаться из материалов с различной концентрацией примесей. Однако повышение концентрации носителей хотя и увеличивает температурную стабильность, снижает в то же время коэффициент тензочувствительности K. Температурная характеристика германиевого тензорезистора представлена на рис. 67. Из характеристики видно, что температурный коэффициент сопротивления может быть положительным, отрицательным или равным нулю.

На вид вольт-амперной характеристики влияют условия теплоотвода, состав окружающей среды и скорость ее перемещения относительно чувствительного элемента. Влияние температуры окружающей среды на вольт-амперные характеристики чувствительного элемента электроакустических преобразователей показано на рис. 68,

где представлено семейство вольт-амперных характеристик германиевого тензорезистора для различных температур.

Представляет интерес влияние на вольт-амперные характеристики чувствительного элемента коэффициента рассеивания. Коэффициент рассеивания является функцией перегрева и зависит от материала, размеров, состояния поверхности рабочего тела и токоподводящих частей, а также от свойств окружающей среды. Семейство

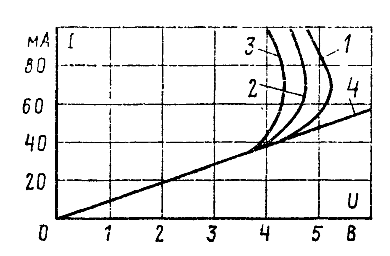


Рис. 68. Вольт-амперные характеристики германиевого тензорезистора при различных температурах окружающей среды.

1 — при *T*-296 К; *2* — при *T*-312 К; *3* — при *T*-333 К; *4* — линия перемещения точек перегиба.

Рис. 69. Семейство вольт-амперных характеристик для различных значений коэффициента рассеивания.

1 — в клее; *2* — на воздухе; *3* — линия перемещения точек перегиба; *4* — линия перемещения точек максимума.

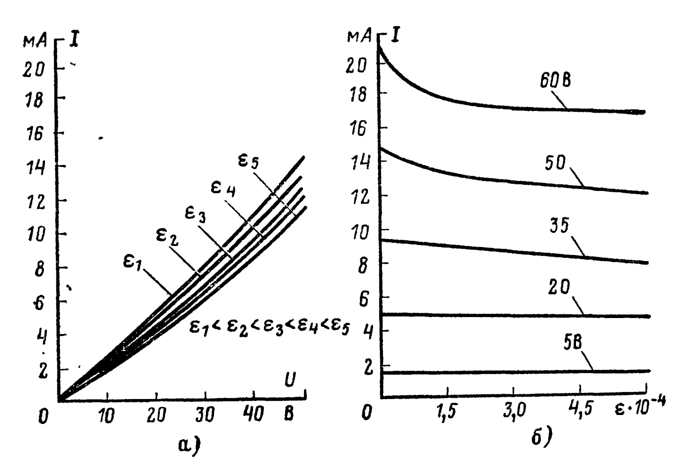


Рис. 70. Характеристики органических полимерных полупроводников с сопряженными кратными связями.

а — вольт-амперные характеристики при разных деформациях; *б* — семейство тензочувствительных характеристик зависимостей тока от деформации при разных электрических напряжениях.

вольт-амперных характеристик для различных значений коэффициента рассеивания представлено на рис. 69. При этом характерные точки вольт-амперной характеристики — точка перегиба и точка максимума — смещаются вдоль лучей *3* и *4* соответственно. Следовательно, при изменении коэффициента рассеивания вольт-амперная характеристика меняет свое положение. Это можно использовать при выборе необходимых режимов работы с целью увеличения мощности сигнала, снимаемого с чувствительного элемента электроакустического преобразователя.

Имея вольт-амперные характеристики нагруженного и ненагруженного чувствительного элемента и его температурную характеристику, можно получить температурную характеристику ко-

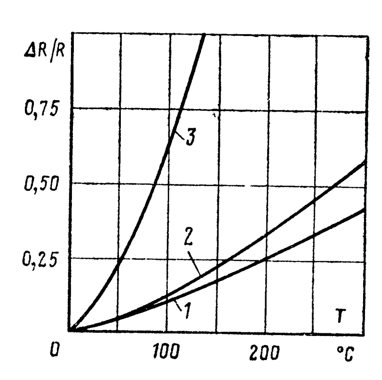


Рис. 71. Зависимость относительного изменения сопротивления от температуры для разных тензорезисторов.

1 — для низкоомного (45 Ом) образца из полициановой кислоты; *2* — для высокоомного (3660 Ом) образца из полицианамида; *3* — для неорганического полупроводникового тензорезистора *n*-типа.

эффициента тензочувствительности. Вольт-амперные и тензочувствительные характеристики полупроводниковых органических элементов электроакустических преобразователей представлены на рис. 70. Зависимость относительного изменения сопротивления от температуры для разных тензорезисторов показана на рис. 71. Деформационные характеристики, т. е. зависимость относительного изменения сопротивления тензорезисторов от относительной деформации приведены на рис. 72. Зависимость тока от приложенного усилия Q при разных напряжениях на мощном *p-n*-переходном элементе представлена на рис. 73.

Можно считать, что наиболее характерными и определяющими все остальные зависимости являются следующие характеристики полупроводниковых чувствительных элементов электроакустических преобразователей:

1) деформационная характеристика $\Delta R/R=f(\varepsilon)$;

2) температурная характеристика сопротивления $\Delta R/R=f(T)$;

3) вольт-амперные характеристики $U=f(I)$ для данной температуры окружающей среды при $\varepsilon=0$ и $\varepsilon=\varepsilon_{раб}$.

Сопротивление чувствительного элемента контролируется обычно с помощью измерительного моста, например Р-333, МО-62 и др. Для снижения тока через тензорезистор можно включать добавочный резистор, сопротивление которого известно с достаточной точностью Измерительный ток через чувствительный элемент при этом должен быть в 10 раз меньше тока, вызывающего разогрев тела

чувствительного элемента. Ток, вызывающий, разогрев тензорезистора, можно определить по вольт-амперной характеристике. Как правило, это то значение тока, при котором вольт-амперная характеристика начинает отклоняться от линейной зависимости.

Схема для экспериментального определения вольт-амперных характеристик чувствительных элементов электроакустических преоб-

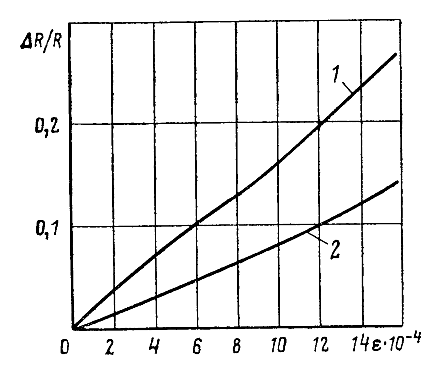


Рис. 72. Деформационные характеристики полупроводниковых тензорезисторов.

1 — для тензорезистора из полициановой кислоты; *2* — для кремниевого тензорезистора.

Рис. 73. Зависимость тока от приложенного усилия при разных напряжениях мощного *p-n*-переходного элемента.

разователей представлена на рис. 74. Схема состоит из вольтметра *V*, миллиамперметра *mA*, исследуемого чувствительного элемента $R_р$, нагрузочного резистора *R*, моста Уитстона *M*, добавочного резистора $R_д$ для ограничения тока через чувствительный элемент и переключателя *B*. Хорошие результаты получаются при использова-

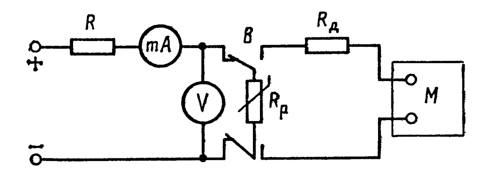


Рис. 74. Схема для снятия характеристик тензорезисторов.

нии электронных цифровых вольтметров с входным сопротивлением 1 МОм и точностью измерения 0,1% (вольтметр ЭЦВ-3). Экспериментальное определение вольт-амперных характеристик сводится к измерению установившегося тока через тензорезистор при различных падениях напряжений на нем. Так как вольт-амперная характеристика может иметь точку максимума, сопротивление нагрузочного

резистора следует выбирать, исключая возможность возникновения релейного эффекта в цепи. Для этого сопротивление резистора R должно превысить абсолютное значение максимального отрицательного динамического сопротивления чувствительного элемента на падающем участке вольт-амперной характеристики. Вследствие малости отрицательного дифференциального сопротивления чувствительного элемента сопротивление резистора R можно брать небольшим. Обычно оно подбирается экспериментально. Весьма важное значение для полупроводниковых чувствительных элементов имеет каче-

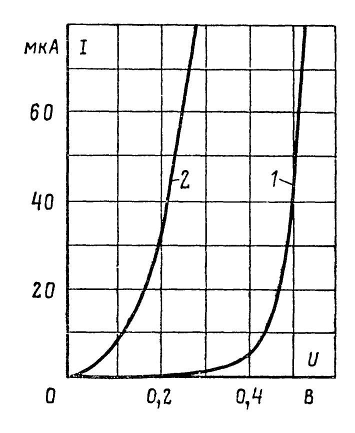


Рис. 75. Прямые ветви вольт-амперных характеристик кремниевого диода.

1 — при отсутствии механического напряжения; 2 — при приложении напряжения в направлении, перпендикулярном плоскости перехода.

Рис. 76. Обратные ветви вольт-амперных характеристик кремниевого диода.

1 — при отсутствии механического напряжения; 2 — при приложении напряжения.

ство омического контакта. Основные требования к омическому контакту сводятся к следующему: 1) низкое переходное сопротивление; 2) отсутствие инжекции неосновных носителей; 3) механическая прочность; 4) линейность вольт-амперной характеристики.

Рассмотрим влияние деформации на вольт-амперные характеристики простейших чувствительных элементов с одним p-n-переходом. Такими чувствительными элементами являются выпрямительные диоды, выполненные например, на основе германия или кремния. На рис. 75 приведены прямые ветви вольт-амперных характеристик кремниевого диода. При действии механического напряжения ток в смещенном в прямом направлении p-n-переходе возрастает в 50 раз.

Обратные ветви вольт-амперных характеристик кремниевого диода, подвергнутого такому же сжатию, представлены на рис. 76. Если для прямой ветви вольт-амперной характеристики экспоненциальное возрастание тока начинается от смещения, немного превышающего 0,4 В, то для обратной ветви начало быстрого роста обратного тока (по абсолютной величине) соответствует смещению приблизительно 50 В. Для обратной ветви изменение тока под действием ме-

ханического напряжения при постоянном электрическом смещении выражено еще сильнее, чем для прямой.

Большой чувствительностью к механическим напряжениям отличаются также германиевые *p-n*-переходы. При исследовании напряжения на германиевых *p-n*-переходах создавались с помощью алмазной иглы, направленной перпендикулярно плоскости *p-n*-перехода. С увеличением механического напряжения для германиевых *p-n*-переходов, так же как и для кремниевых, наблюдалось возрастание тока.

Представляет интерес также использование в качестве чувствительных элементов электроакустических преобразователей полупро-

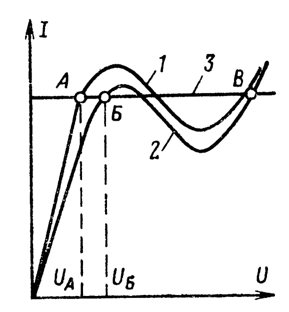


Рис. 77. Вольт-амперные характеристики стандартных туннельных диодов, работающих в режиме переключения.

1 — без механического напряжения; *2* — при механическом напряжении; *3* — линия постоянного тока.

водниковых стабилитронов (диодов Зинера). Предпочтительный режим работы для такого преобразователя — смещение рабочей точки в область пробоя за счет источника постоянного напряжения. Любое изменение вольт-амперной характеристики под действием механического напряжения вызовет в этом случае большое изменение тока, которое можно определить, например, путем измерения падения напряжения на последовательно включенном постоянном резисторе. Соответствующим выбором рабочей точки можно получить электроакустический преобразователь с мало зависящим от температуры окружающей среды режимом работы. Это возможно, как правило, для чувствительных элементов с малыми напряжениями пробоя (около 5—6 В). Если же желательно использовать диод, обладающий большим напряжением пробоя, можно применить известные методы температурной компенсации, основанные на использовании второго диода, имеющего температурный коэффициент с обратным знаком.

Для измерения давлений, сил или деформаций может быть использовано изменение вольт-амперных характеристик туннельного диода или транзистора. При этом возможны два режима работы туннельного диода: режим переключения и режим усиления. Для экспериментального определения вольт-амперных характеристик туннельного диода может быть использована схема, описанная ранее (рис. 74). Вольт-амперные характеристики стандартных туннельных диодов, работающих в режиме переключения, показаны на рис. 77. На них можно различить три характерных участка: первый участок положительного сопротивления, участок отрицательного сопротивления, обычно незаметный при таком режиме работы, и второй уча-

сток положительного сопротивления. Перемещение кривой *1* вниз под действием давления характерно для диодов, изготовленных из полупроводниковых материалов с положительным значением производной ширины запрещенной зоны по давлению. К этой категории относятся германий, арсенид галлия и антимонид галлия. В случае кремниевого диода наблюдается смещение вольт-амперной кривой вверх, так как у этого материала производная ширины запрещенной зоны по давлению имеет отрицательное значение. Из рис. 77 видно, что по изменению тока или напряжения можно измерять механическую деформацию. Если выбрать режим работы при постоянном токе, то заданному значению тока *I* соответствует точка смещения *А* на кривой *1*. Приложение давления вызывает сдвиг вольт-амперной характеристики из положения *1* в положение *2* и появление новой точки смещения Б. Это соответствует изменению напряжения смещения $U_б - U_а$, по значению которого можно измерять давление. При таком способе измерения давления чувствительность зависит от типа диода: наименьшей чувствительностью обладают кремниевые диоды, а наибольшей — диоды из антимонида галлия.

Для измерения давления можно также использовать режим постоянного напряжения на диоде. Тогда изменения давления будут соответствовать изменениям тока. Можно также использовать промежуточный режим работы, например режим постоянной нагрузки. Режим переключения может быть применен для построения переключателей давления или сигнальных устройств. Если давление возрастает до такого значения, что пиковый ток падает ниже линии постоянного тока *3*, то точка смещения скачком перемещается в точку *В*, лежащую на втором участке положительного сопротивления вольт-амперной характеристики. В результате этого скачка на диоде возникает изменение напряжения, которое можно использовать для включения сигнального устройства. Это изменение напряжения имеет значение, равное сотням милливольт, и зависит от материала туннельного диода и степени его легирования. Оно связано с шириной запрещенной зоны полупроводникового материала: чем больше ширина запрещенной зоны, тем больше изменение напряжения. С точки зрения такого применения наилучшими являются диоды из арсенида галлия; затем идут диоды из кремния и германия. Одним из недостатков применения туннельных диодов в режиме переключения является тот факт, что точка смещения не возвращается из точки *В* в точку *А* при понижении давления. Для того чтобы вернуть такой переключатель в начальное положение *А*, необходимо сдвинуть линию постоянного тока *3* почти до нуля, чтобы точка смещения спустилась из положения *В* по второму участку положительного сопротивления до самого нижнего положения и скачком вернулась на первый участок положительного сопротивления. Этот недостаток может быть устранен при работе туннельного диода в режиме усиления.

Чувствительность туннельного диода к изменению давления может быть повышена, если использовать не первый участок положительного сопротивления, а участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Участок отрицательного дифференциального сопротивления можно сделать стабильным, если шунтировать диод резистором. Вольт-амперная характеристика шунтированного резистором диода имеет вид, показанный на рис. 78 (кривая *3*). При этом кривая *1* соответствует обычной характеристике туннельного диода в режиме переключения. Средняя часть вольт-амперной ха-

рактеристики 3 системы диод — резистор горизонтальна. Это объясняется тем, что сопротивление шунтирующего резистора выбрано равным отрицательному сопротивлению диода. Наклон плоской части характеристики системы диод — резистор можно изменять, выбирая соответствующее сопротивление резистора.

На рис. 79 показаны вольт-амперные характеристики шунтированного резистором диода, используемого для измерения давления. Такой режим называется режимом усиления. Под действием давления вольт-амперная характеристика системы диод — резистор 1 сдвигается в положение 2. При этом точка смещения перемещается

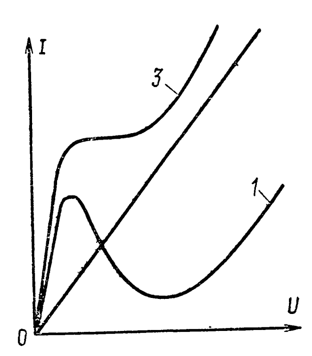


Рис. 78. Вольт-амперные характеристики.

1 — диода без шунтирования; 2 — резистора; — диода, шунтированного резистором.

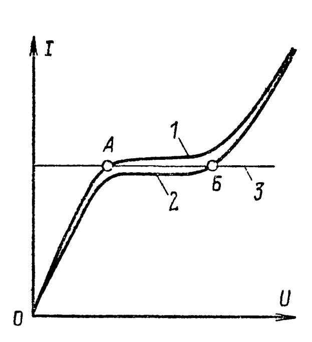


Рис. 79. Вольт-амперные характеристики шунтированного резистором диода, используемого для измерения акустического давления.

1 — без давления; 2 — при давлении; 3 — линия постоянного тока.

из положения А в положение Б. В результате возникает изменение напряжения, которое в этом режиме может быть значительно больше, чем при работе в режиме переключения. Изменение напряжения, соответствующее данному изменению давления, можно в значительных пределах регулировать путем подбора сопротивления шунтирующего резистора.

Рассмотренные методы измерения давления связаны с поддержанием либо постоянного тока, либо постоянного напряжения смещения на диоде. Промежуточный случай показан на рис. 80. Линия нагрузки 4, т. е. линия, по которой перемещается точка смещения, пересекает ось напряжения в точке $U_б$, где $U_б$ — приложенное напряжение, и ось тока в точке $I = U_б/R$. Наклон этой линии определяется сопротивлением резистора R, включенного последовательно с шунтированным диодом и батареей. Кривые 2 и 3 приведены для кремниевого диода. Для германиевого диода эти кривые меняются местами. В таком режиме при изменениях давления наблюдаются как изменение тока, так и изменение напряжения. На практике режимы постоянного тока или напряжения следует рекомендовать в зависимости от того, требуются ли от данного датчика большие сиг-

налы по напряжению или по току. Если же необходимо получить максимальный выход по мощности, как это может иметь место в случае микрофонов или гидрофонов, то нужно применять описанный промежуточный режим.

Важно рассмотреть влияние деформации или всестороннего давления на вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов с двумя *p-n*-переходами, например транзисторов, так как та-

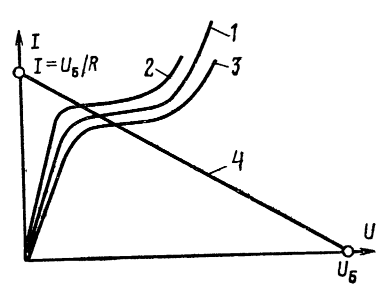


Рис. 80. Вольт-амперные характеристики туннельного диода, работающего в режиме усиления.

1 — при промежуточном давлении; *2* — при повышенном давлении; *3* — при пониженном давлении; *4* — линия нагрузки.

кие полупроводниковые приборы могут быть использованы не только в качестве преобразователей давления в электрический сигнал, но и одновременно в качестве усилительных элементов, т. е. представлять собой по существу измерительно-преобразовательные устройства.

На рис. 81 представлены выходные вольт-амперные характеристики одного из зарубежных образцов кремниевого диффузионного *n-p-n* мезатранзистора. Давление действовало на транзистор не не-

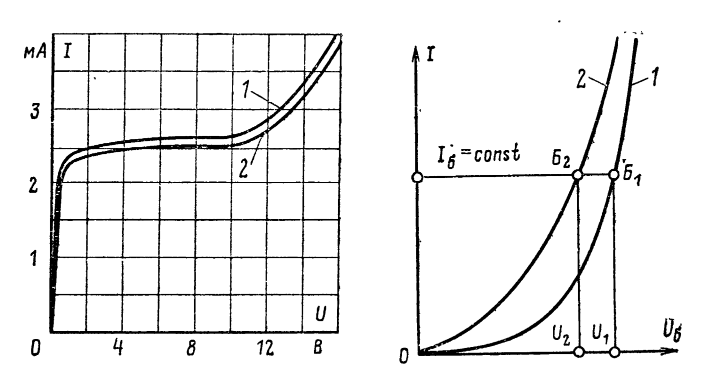


Рис. 81. Вольт-амперные характеристики транзистора.

1 — при атмосферном давлении; *2* — при давлении 140 МПа.

Рис. 82. Влияние локального давления на прямую ветвь вольт-амперной характеристики эмиттерного *p-n*-перехода кремниевого транзистора

1 — без давления; *2* — при действии локального давления.

посредственно, а через передающую среду — масло. Чтобы избежать искажения характеристики транзистора, поверхность его была защищена специальным диэлектрическим покрытием. Были проведены также экспериментальные исследования влияния одноосного напряжения на характеристики транзистора, жестко соединенного с консольной балкой. При этом использовался германиевый мезатранзистор *p-n-p* типа, приклеенный коллектором к молибденовой балке прямоугольного сечения толщиной 0,25 мм. Было обнаружено, что изгиб балки вниз или деформация растяжения в плоскости переходов транзистора вызывает возрастание коллекторного тока. Сжатие или изгиб балки вверх приводит к уменьшению коллекторного тока. Эти результаты можно объяснить на основе пьезорезистивного эффекта.

Как правило, используются две электрические схемы включения транзистора: с общим эмиттером и общей базой. При этом возможен третий способ создания механических напряжений в транзисторах — при помощи острия. Влияние сосредоточенного неоднородного напряжения, возникающего под острием, на прямую ветвь вольт-амперной характеристики эмиттерного *p-n*-перехода кремниевого транзистора при температуре 20° С показано на рис. 82. Эти эффекты могут быть обусловлены различными механизмами, в том числе изменением под действием давления подвижности носителей, изменением ширины запрещенной зоны, изменением времени жизни носителей, вызванное тем, что при больших деформациях под острием возникают центры рекомбинации.

На рис 82 точка $Б_1$ соответствует начальному смещению эмиттерного перехода, а $Б_2$ — новой рабочей точке, возникшей в результате приложенного механического напряжения. Пусть *p-n*-переход работает в режиме постоянного тока базы $I_б = \mathrm{const}$. Приложение механического напряжения приводит к уменьшению потенциала смещения на переходе. Это вызывает уменьшение тока коллектора, как это следует из экспериментальных данных и из уравнения

$$I_к = I_1 \exp[(qU_{бэ}/kT) + I_2],$$

где $I_к$ — ток коллектора; I_1 — начальный ток коллектора; q — заряд электрона; $U_{бэ}$ — разность потенциалов между базой и эмиттером; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; I_2 — ток насыщения коллектора.

Отсюда легко вычислить изменение напряжения для конкретного случая. Например, сила 2 г, действующая через острие радиусом 25 мкм на эмиттер, вызывает изменение коллекторного тока на 0,8 мА. Следовательно, при данном напряжении $U_{кэ}$ коллекторный ток уменьшится с 5 до 4,2 мА.

Для радиолюбителей представляет интерес рассмотрение основных характеристик отечественных транзисторов с точки зрения использования их в качестве чувствительных элементов электроакустических преобразователей. На рис. 83 приведено линеаризованное семейство вольт-амперных характеристик электромеханического элемента, выполненного на основе германиевого плоскостного транзистора П210А типа *p-n-p*. С транзистора снималась защитная крышка и к нему прикладывалось усилие с помощью жесткого крепления электрода с точкой приложения нагрузки. Значительный разброс вольт-амперных характеристик указывает на высокую чувствительность такого элемента. Для определения коэффициентов чувствитель-

ности элемента по току или по напряжению, представляющих собой отношения приращений соответственно тока или напряжения к приращению механической нагрузки, может быть использовано семейст-

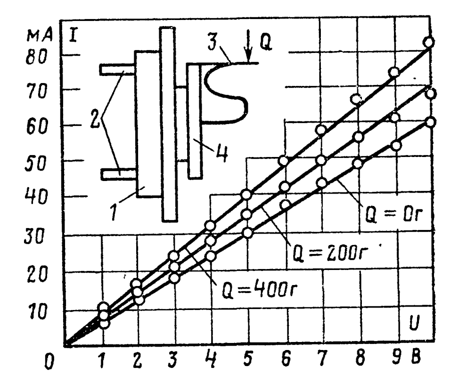


Рис. 83. Линеаризованное семейство вольт-амперных характеристик и конструктивная схема электроакустического преобразователя на основе транзистора П210А.

1 — корпус; *2* — выводы; *3* — электрод; *4* — *p-n*-переход.

во выходных характеристик электромеханического преобразователя с транзистором. Из графиков, представленных на рис. 83, видно, что если для напряжения $U=2$ В зависимость $I=f(Q)$ практически линейна, то с увеличением U нелинейность увеличивается тем больше, чем больше U.

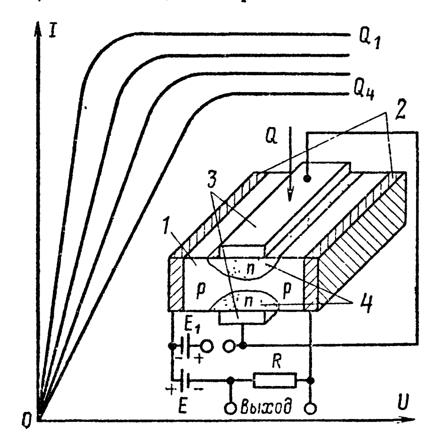


Рис. 84. Вольт-амперные характеристики и конструктивная схема электроакустического преобразователя на полевом транзисторе.

С точки зрения применения полевых (канальных) транзисторов в качестве чувствительных элементов электроакустических преобразователей представляет интерес рассмотрение их вольт-амперных характеристик. Они близки к вольт-амперным характеристикам вакуумных пентодов. В то же время полевые транзисторы сохраняют все преимущества обычных транзисторов: малые размеры, незначительное потребление энергии, большую надежность и механическую прочность. Конструкция полевого транзистора с каналом *p*-типа показана на рис. 84.

Полевой транзистор представляет собой тонкую пластинку полупроводника с проводимостью *p*-типа *1*, содержащую два близко расположенных *p-n*-перехода. На противоположных концах пластинки созданы два омических контакта *2*, которые называются контактами истока и стока. В обеих

областях полупроводника с проводимостью *n*-типа *4*, носящих название затвора, созданы омические контакты *3*. При включении между омическими контактами *2* источника питания E через пластинку потечет ток, который согласно закону Ома будет зависеть от сопротивления нагрузки и сопротивления пластинки. Особенностью прибора является то, что ток, обусловленный источником E, протекает не по всему сечению пластинки, а лишь по проводящему каналу, заключенному между запирающими слоями, которые образуются на границах между областями *p* и *n*. Сечение проводящего канала может изменяться напряжением E_1, приложенным между омическим контактом *2* и затвором. Так как сопротивление определяется сечением канала, то, изменяя напряжение источника E_1, можно управлять током, протекающим через резистор нагрузки R. Семейство вольт-амперных характеристик определяется разными значениями напряжения E_1. Приложение усилия Q в направлении, перпендикулярном контактам затвора, воздействует на изменение ширины канала. Семейство вольт-амперных характеристик полевого транзистора для разных значений Q представлено на рис. 84; оно аналогично семейству вольт-амперных характеристик при разных значениях E_1. Это обстоятельство позволяет легко осуществить коррекцию выходного сигнала в процессе настройки и измерения неэлектрического параметра.

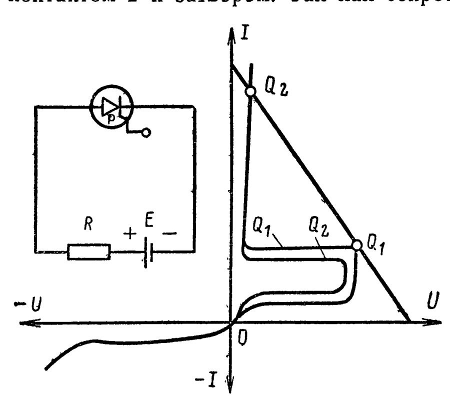


Рис. 85. Вольт-амперные характеристики и схема электроакустического преобразователя на тиристоре.

Получившие широкое распространение в различных областях науки и техники многослойные полупроводниковые структуры могут найти применение и как чувствительные элементы электроакустических преобразователей. Преимуществами таких преобразователей являются малые размеры, высокая надежность и стабильность, высокий к. п. д., большие выходные мощности, легкость регулировки и настройки. Наличие на вольт-амперной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением позволяет строить на их основе простые схемы бесконтактных реле, а также частотно-временных преобразователей. Вольт-амперные характеристики четырехслойных структур (динисторов, тиристоров, бинисторов), не имеющих управляющего электрода либо имеющих один или два управляющих электрода, не симметричны. На рис. 85 показано семейство вольт-амперных характеристик тиристора для постоянного сигнала на управляющем электроде и для различных механических воздействий.

Аналогичное влияние оказывает механическое воздействие на вольт-амперную характеристику триака (симмистора). Однако их вольт-амперная характеристика симметрична, что облегчает ис-

пользование в цепях переменного тока. Симмистор можно заменить последовательно-параллельным включением двух тиристоров. Вольт-амперная характеристика такой цепи аналогична вольт-амперной характеристике симмистора.

Использование в качестве чувствительного элемента электроакустического преобразователя запираемого тиристора позволяет осуществлять в релейном режиме работы не только включение в проводящее состояние, но и выключение прибора при помощи воздействия сигнала на управляющий электрод. Это расширяет схемные возможности применения четырехслойных структур в качестве чувствительных элементов электроакустических преобразователей.

Для многослойных структур, так же как и для туннельных диодов, используемых в качестве преобразователей механических величин в электрические, характерны два режима работы: режим переключения и режим усиления. В режиме усиления прибор с многослойной структурой необходимо шунтировать постоянным резистором.

18. Повышение линейности выходных характеристик

Нелинейность является отрицательным качеством, присущим большинству полупроводниковых электроакустических преобразователей. Нелинейность выходной характеристики преобразователя означает разные приращения выходного сигнала и при равных приращениях входного воздействия. Без соответствующих мер по повышению линейности нельзя создать высококачественный электроакустический преобразователь.

Наиболее распространенными способами повышения линейности выходной характеристики преобразователя являются работа на линейных участках вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов, введение отрицательных обратных связей, применение компенсационной схемы измерения, подбор параметров схемы, введение цепей компенсации нелинейности и др. Рассмотрим подробней каждый из перечисленных методов повышения линейности выходных характеристик полупроводниковых электроакустических преобразователей. Как известно, нелинейная вольт-амперная характеристика полупроводникового прибора имеет отдельные более или менее линейные участки. Обычно работа на более линейных участках вольт-амперных характеристик повышает общую линейность преобразователя. Однако в случае применения полупроводникового прибора в качестве электроакустического преобразователя такой подход не всегда дает нужный эффект. Связано это с тем, что обычно не совсем линейна функция преобразования акустического давления или усилия иглы в изменение электрического параметра. В этом случае нередко, наоборот, работа на нелинейном участке вольт-амперной характеристики компенсирует нелинейность характеристики преобразования неэлектрического параметра в электрический, что в конечном счете повышает линейность выходной характеристики электроакустического преобразователя.

Примером взаимной компенсации нелинейности служит полупроводниковый тензометрический мост. Использование в мостовой схеме одного рабочего кремниевого тензорезистора приводит к нелинейности выходной характеристики моста за счет нелинейности тензометрической характеристики тензорезистора. В то же время

измерительный мост сам обладает нелинейностью, которая при соответствующем выборе параметров может скомпенсировать нелинейность полупроводникового тензорезистора. Поскольку нелинейность измерительного моста зависит от соотношения сопротивлений плеч, то, меняя это соотношение, можно менять нелинейность выходной характеристики тензометрического мостового преобразователя. Обычно два плеча моста имеют равные сопротивления. Другие два резистора также имеют равные между собой сопротивления. Для изменения нелинейности схемы необходимо одновременно изменить сопротивления в двух смежных плечах моста на одну и ту же величину. Сделать это можно следующим образом.

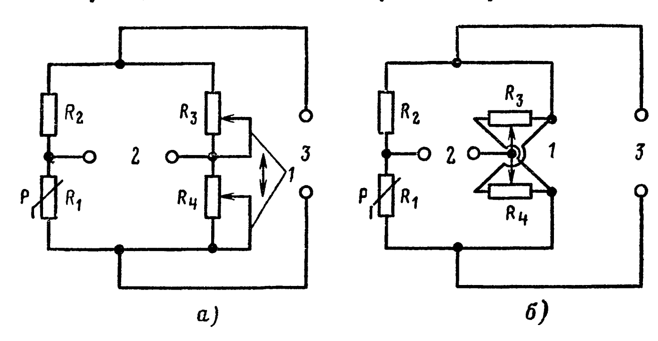


Рис. 86. Мостовая тензорезистивная схема с компенсатором нелинейности.

а — с двумя переменными резисторами; *б* — с двумя накрест соединенными переменными резисторами.

В схеме, показанной на рис. 86, *а*, два смежных плеча моста составлены равными по сопротивлениям резисторами R_1 и R_2, один или оба из которых представляют собой полупроводниковые тензорезисторы с разными нелинейностями. Два других плеча моста образованы переменными резисторами R_3 и R_4, имеющими одинаковые сопротивления и механически связанные движки *1*. Питание мостовой схемы осуществляется через клеммы *2*, а выходной сигнал снимается с клемм *3*. При одновременном перемещении движков *1* сопротивления резисторов R_3 и R_4 меняются на одни и те же величины, в результате чего сохраняется равновесие схемы, но изменяется соотношение сопротивлений противоположных плеч. Иными словами, сохраняется равенство между произведениями $R_1R_3=R_2R_4$, но меняются значения этих произведений. Таким образом, каждому положению движков резисторов R_3 и R_4 будет соответствовать свое значение нелинейности мостовой схемы. А это значит, что имеется возможность скомпенсировать нелинейность тензометрических преобразователей и в значительной степени линеаризировать выходную характеристику преобразователя.

Схема, показанная на рис. 86, *б*, отличается от предыдущей тем, что в ней несколько по-иному выполнен компенсатор нелинейности. Как и в предыдущей схеме, компенсатор нелинейности образован двумя переменными резисторами R_3 и R_4, однако их соединение между собой и в общий мост выполнено по-другому. Параллель-

но рабочим плечам моста R_1 и R_2 включена цепь, образованная переменными резисторами R_3 и R_4. Резисторы R_3 и R_4 связаны общими движками *1* не только механически, но и электрически. Движок *1* служит вершиной одной из диагоналей моста. Соединение крайних выводов резисторов R_3 и R_4 перекрестное. Питание, как и в предыдущей схеме, подводится к клемме *2*, а выходной сигнал снимается с клемм *3*. Особенность описываемого компенсатора нелинейности состоит в том, что наибольшее отношение сопротивлений плеч моста R_3/R_2 и R_4/R_1 соответствует среднему положению движков переменных резисторов R_3 и R_4. При движении движков от среднего положения к крайним вышеуказанные соотношения сопротивле-

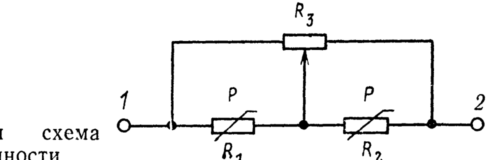


Рис. 87. Электрическая схема компенсатора нелинейности.

ний плеч моста уменьшаются, чем достигается возможность линеаризации выходной характеристики электроакустического полупроводникового преобразователя.

На рис. 87 показана цепочка, которая может быть использована для компенсации нелинейности характеристики преобразователя. Цепочка состоит из двух полупроводниковых тензорезисторов R_1 и R_2. Параллельно последовательному соединению тензорезисторов R_1 и R_2 подключен переменный резистор R_3. Движок переменного резистора соединен с общей точкой тензорезисторов R_1 и R_2. Включение компенсирующей цепочки в измерительную схему осуществляют через клеммы *1* и *2* последовательно с источником питания. Элементы R_1 и R_2 представляют собой два дополнительных электроакустических полупроводниковых преобразователя, работающих на разные знаки деформации, т. е. один из них работает на растяжение, а другой на сжатие. Оба преобразователя могут подвергаться однозначной деформации. В этом случае преобразователи должны иметь разные знаки коэффициентов преобразования. В обоих случаях каждому положению движка переменного резистора будет соответствовать свое значение эквивалентного сопротивления цепи. Передвигая движок переменного резистора от одного крайнего положения до другого, получаем при действии неэлектрического параметра разные приращения эквивалентного сопротивления положительного или отрицательного знака. Фактически мы будем иметь управляемый по неэлектрическому параметру источник питания. Чувствительность в каждой точке диапазона преобразования будет меняться в соответствии со значением неэлектрического параметра, чувствительностью компенсирующих электроакустических преобразователей R_1 и R_2, соотношением параметров переменного резистора R_3 с параметрами электроакустических преобразователей R_1 и R_2 и положением движка переменного резистора R_3. Электроакустические преобразователи R_1 и R_2 могут быть выполнены в виде полупроводниковых тензорезисторов или полупроводниковых элементов с *p*-*n*-переходами. При компенсации нелинейности тензометрического моста на упругом элементе помещают два дополнительных тензорезистора.

Тензорезисторы могут быть помещены на одной стороне упругой пластины. В этом случае тензорезисторы должны иметь разные знаки коэффициентов тензочувствительности. Например, могут быть использованы кремниевые тензорезисторы *p*- и *n*-типов. Если имеется возможность расположения тензоэлементов на разных сторонах упругой пластины, тензорезисторы должны иметь один знак коэффициента тензочувствительности. Отличаться по знаку будут деформации полупроводниковых тензорезисторов. Сопротивления компенсационных тензорезисторов для повышения диапазона компенсации должны превышать сопротивления рабочих тензорезисторов.

Повышению линейности выходной характеристики преобразователя способствует использование компенсационного метода преобразования неэлектрического параметра в электрический. В зависимости от вида неэлектрического параметра компенсация может быть осуществлена по давлению, усилию или перемещению. Реализация этих схем сложна. Более просто осуществить компенсацию по электрическому параметру: сопротивлению, току, напряжению.

19. Температурная компенсация

Для повышения точности работы электроакустических преобразователей необходимы либо термостатирование, либо термокомпенсация этих устройств. Дело в том, что наряду со значительными преимуществами полупроводниковых электроакустических преобразователей они имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что их параметры зависят от температуры окружающей среды. Это ухудшает режимы работы электроакустических преобразователей, а в ряде случаев делает вообще невозможным нормальное их функционирование. Термостатирование сложно в осуществлении и практическом использовании, резко удорожает изготовление качественных электроакустических преобразователей и тем не менее часто не дает ожидаемого эффекта. В связи с изложенным особый интерес представляет термокомпенсация зависимых от температуры элементов вышеупомянутых преобразователей.

При использовании в электроакустических преобразователях тензорезисторов необходимо поддерживать постоянный ток в тензорезисторе, сопротивление которого в значительной мере изменяется под влиянием температуры окружающей среды. Для этих случаев характерны малое сопротивление тензорезистора и положительный температурный коэффициент его.

Изменение тока через тензорезистор, вызванное изменением сопротивления под действием температуры, может нарушить нормальные условия работы устройства, при которых изменение тока через тензорезистор должно укладываться в заданную область допусков.

Широкое применение при термокомпенсации находят терморезисторы, работающие в линейном режиме. В этом случае семейство вольт-амперных характеристик представляет собой прямые, выходящие из начала координат под углом α, причем $\operatorname{tg}\alpha = R$, а сопротивление терморезистора R определяется следующим выражением [16]:

$$R = R_\infty \exp(B/T),$$

где R_∞ и B — постоянные коэффициенты, характеризующие свойства материала и геометрию терморезистора.

Как известно, температурный коэффициент терморезистора

$$a = (1/R)(dR/dT) = -B/T^2.$$

Для термокомпенсации терморезисторами важно произведение Ra, которое должно соответствовать подобному произведению для тензорезисторов. Необходимым условием термокомпенсации при этом является возможность обеспечения необходимых режимов работы термокомпенсируемого и термокомпенсирующего элементов. Вопросам термокомпенсации тензорезисторов поликристаллическими терморезисторами посвящен ряд работ [17]. Однако применение промышленных терморезисторов не всегда дает желательные результаты ввиду особенностей характеристик резисторов с положительным температурным коэффициентом, к которым относится большая группа полупроводниковых тензорезисторов.

Рабочая характеристика тензорезистора описывается выражением

$$S_R = \Delta R/R = c_1 \varepsilon + c_2 \varepsilon^2 + \cdots,$$

где ε — относительная деформация; c_1 и c_2 — коэффициенты, зависящие от температуры окружающей среды и протекающих через тензорезистор токов.

Для коэффициентом c_1 и c_2 можно записать:

$$c_1 = \nu_1 k_{T1} k_{I1};$$

$$c_2 = \nu_2 k_{T2} k_{I2},$$

где ν_1 и ν_2 — коэффициенты тензодатчика, определяемые по замерам двух значений S_{R1} и S_{R2} при соответствующих значениях ε_1 и ε_2:

$$\nu_1 = \left(S_{R1}\,\varepsilon_2^2 - S_{R2}\,\varepsilon_1^2\right)/\left(\varepsilon_1\,\varepsilon_2^2 - \varepsilon_2\,\varepsilon_1^2\right);$$

$$\nu_2 = \left(S_{R2}\,\varepsilon_1 - S_{R1}\,\varepsilon_2\right)/\left(\varepsilon_1\,\varepsilon_2^2 - \varepsilon_2\,\varepsilon_1^2\right).$$

Температурные коэффициенты k_{T1} и k_{T2} определяются из выражений

$$k_{T1} = 298/T; \tag{1}$$

$$k_{T2} = (298/T)^2. \tag{2}$$

Влияние тока, протекающего через тензорезистор, на коэффициенты c_1 и c_2 видно из уравнения теплового баланса

$$I^2 R = U^2/R = H\,(T - T_0), \tag{3}$$

где R — сопротивление тензорезистора; U, I — напряжение на тензорезисторе и ток через него; T — температура тензорезистора при нормальной температуре окружающей среды: T_0 — нормальная температура окружающей среды (298К); H — коэффициент рассеивания.

Из уравнения (3) следует, что

$$T = (I^2 R + HT_0)/H = (I^2 R/H) + T_0. \tag{4}$$

Совместное решение уравнений (1), (2) и (4) дает следующие значения коэффициентов k_{I1} и k_{I2}:

$$k_{I1} = T_0 H / (I^2 R + HT_0);$$

$$k_{I2} = [T_0 H / (I^2 R + HT_0)]^2.$$

Коэффициент рассеивания H может быть определен по вольт-амперной и температурной характеристикам. Для этого по вольт-амперной характеристике (экспериментально определенной при нормальной температуре) для заданного значения тока подсчитывают мощность, рассеиваемую тензодатчиком, и его сопротивление. С помощью температурной характеристики по найденному сопротивлению находят температуру тензорезистора, подставляемую далее в уравнение (3).

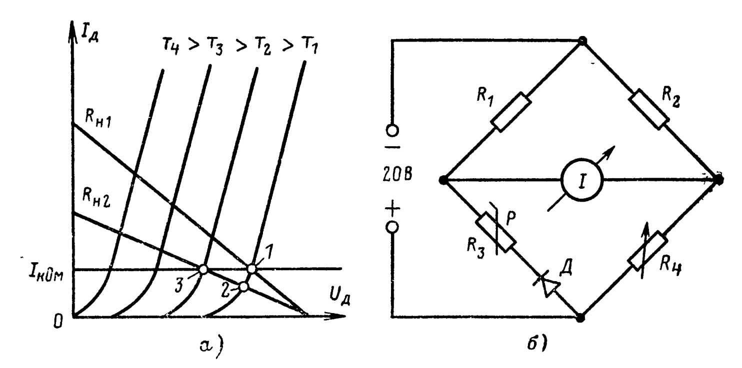


Рис. 88. Термокомпенсация тензорезистивного элемента электроакустического преобразователя с помощью полупроводникового диода.

а — вольт-амперные характеристики; *б* — схема термокомпенсации.

Так как коэффициент H зависит от многих факторов (материала тензорезистора и упругого элемента, клея, температуры окружающей среды и др.), знание этой величины при проектировании схем термокомпенсации является необходимым.

Как показали экспериментальные исследования, полупроводниковые приборы в ряде случаев дают эффект термокомпенсации лучше, чем поликристаллические терморезисторы. Термокомпенсация с помощью полупроводникового диода была опробована на кремниевом тензорезисторе с сопротивлением при нормальной температуре 110 Ом и коэффициентом $H = 9{,}8 \cdot 10^{-2}$ Вт/°С. В качестве термокомпенсирующего элемента был взят кремниевый диод типа Д203.

Принцип термокомпенсации пояснен на рис. 88, *а*, из которого видно, что увеличение температуры от T_1 до T_2 вызовет переход рабочей точки из положения *1* в положение *3*, так как увеличение сопротивления нагрузки $R_{н2} > R_{н1}$ будет скомпенсировано увеличением тока через диоды $I_2 > I_1$ при $U_д = \text{const}$. В результате ток, протекающий через последовательно соединенные диод *Д* и компенси-

руемый резистор R_3, остается неизменным $I_{ком}$. Эта зависимость тока, протекающего через *p-n*-переход, от температуры может быть использована для термокомпенсации тензорезистора. Для этого цепь из последовательно сбединенных тензорезистора R_3 и диода *Д* включалась в мостовую схему (рис. 88, *б*), питаемую постоянным током, так, чтобы диод работал при прямом включении и через тензорезистор протекал ток около 7 мА.

Балансировкой моста (изменением сопротивления резистора R_4) было достигнуто, чтобы при изменении температуры окружающей среды от 20 до 70° С сопротивление последовательно соединенных диода и тензорезистора изменилось на 0,95 Ом. Положительные результаты были получены при экспериментальном определении зависимостей сопротивлений диодов Д203, Д809 и Д810, включенных в прямом направлении, от температуры окружающей среды в диапазоне от 20 до 75° С (табл. 2).

Таблица 2

Т,°С	Термоэлементы					
	Д203(1)	Д809	Д810	Д203(2)	Тензорезистор (Si)	Д203(1)+тензорезистор (Si)
20	94,16	95,67	94,81	92,36	145,17	239,33
30	92,04	93,62	92,68	90,00	146,93	238,97
50	88,04	89,58	88,54	85,70	151,46	239,50
75	83,38	84,86	83,76	81,48	156,54	239,92

Термокомпенсация может быть осуществлена аналогичным путем и при использовании двух тензорезисторов, включенных в смежных плечах. Температурный разбаланс моста в этом случае значительно меньше, чем при одном тензорезисторе.

Термокомпенсация элементов электроакустических преобразователей может быть осуществлена с помощью универсального термокомпенсатора (рис. 89). Этот термокомпенсатор применяется для компенсации температурного ухода нуля и изменения чувствительности элементов с любым знаком и значением ТКС. Он состоит из двух последовательно включенных терморезисторов R_{T+} и R_{T-} с разными знаками ТКС. К крайним клеммам этой цепочки подключены контакты потенциометра *R*, движок которого электрически связан со средней точкой соединения терморезисторов R_{T+} и R_{T-}.

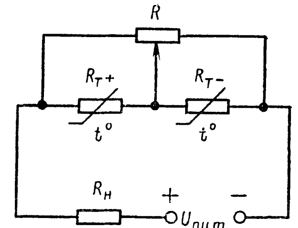


Рис 89. Схема универсального термокомпенсатора.

При изменении положения движка потенциометра получаем разные значения и разные знаки ТКС термокомпенсатора. Рассмотренный термокомпенсатор может быть использован для компенсации температурного ухода нуля и изменения чувствительности выходной характеристики тензорезистора.

Термокомпенсацию также можно осуществить путем включения термокомпенсирующих элементов в цепь управляющего электрода чувствительного элемента электроакустических преобразователей. Такое решение основано на том, что выходные вольт-амперные характеристики полупроводниковых электроакустических преобразователей изменяются не только в зависимости от тензосигналов, но и от температуры окружающей среды и от управляющего тока. Суть метода состоит в том, что, изменяя ток управления, можно добиться в определенном режиме работы тензотранзистора или тензотиристора компенсации изменения выходных параметров от влияния температуры окружающей среды. Очевидно, что для этого в управляющую цепь полупроводникового прибора необходимо включить термокомпенсирующий элемент, ток через который является одновременно током управления и изменяется таким образом, чтобы скомпенсировать изменение выходных характеристик вследствие влияния температуры.

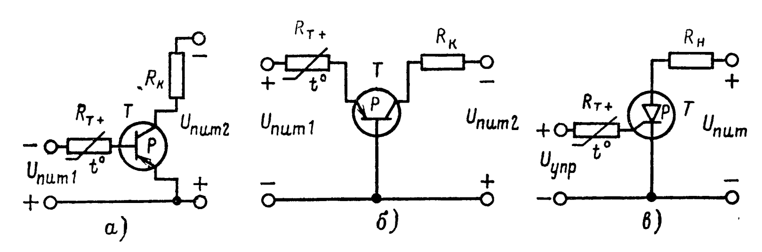


Рис. 90. Схемы термокомпенсации тензочувствительных полупроводниковых приборов по управляющему электроду.

а — с тензотранзистором, включенным по схеме с общим эмиттером; *б* — с тензотранзистором, включенным по схеме с общей базой; *в* — с тензотиристором.

Тензотранзисторы в схемах с общим эмиттером и общей базой, а также тензотиристоры имеют взаимно-обратное влияние температуры среды и управляющего тока, т. е. увеличение температуры среды соответствует уменьшению тока управления, и наоборот.

Из вышесказанного следует, что для термокомпенсации полупроводниковых электроакустических преобразователей по управляющему электроду требуется включение в цепь управления термокомпенсирующего элемента с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Для этой цели возможно использование кремниевых стабилитронов, монокристаллических терморезисторов, позисторов и т. д. (рис. 90, *а*, *б*).

В электроакустических преобразователях с тензотиристорами (рис. 90, *в*) осуществляют термостабилизацию напряжения переключения, так как это приводит к термостабилизации всех точек вольт-амперной характеристики.

В электроакустических преобразователях с электронно-дырочными переходами можно использовать синтезированные цепочки, состоящие из терморезистора и обычных резисторов. На рис. 91 представлены две возможные синтезированные цепочки.

В электроакустических преобразователях температурная составляющая тока, протекающего через тензодиод, смещенный в пря-

мом направлении, может быть скомпенсирована последовательно включенной синтезированной цепочкой, содержащей терморезистор с положительным ТКС, в качестве которого может быть использован позистор или монокристаллический терморезистор (рис. 92).

Вопросы термокомпенсации электроакустических преобразователей решаются значительно проще в дифференциальных и мостовых

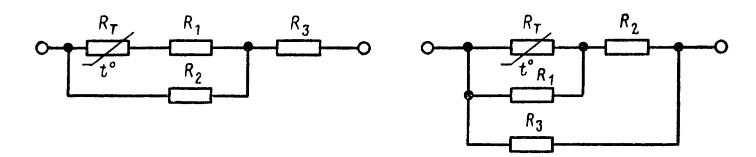


Рис. 91. Термокомпенсирующие синтезированные цепочки.

схемах включения. При дифференциальном включении тензодиода в другую ветвь необходимо включить обычный полупроводниковый диод, смещенный в том же направлении, что и тензодиод (рис. 93).

Термокомпенсация тензодиода в мостовой схеме показана на рис. 94. При этом полная компенсация тензодиода возможна в том случае, если тепловые параметры тензодиода и термокомпенсируемого диода совпадают. Радиолюбителем такой подбор может быть осуществлен достаточно просто.

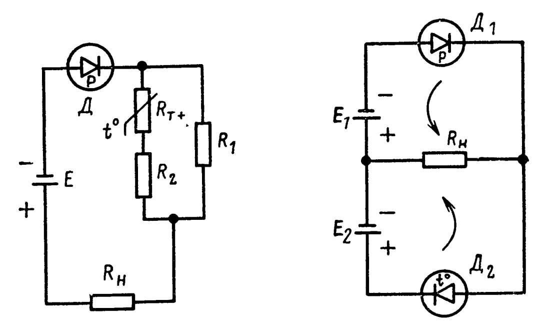


Рис. 92. Схема термокомпенсации тензодиода с помощью монокристаллического тензорезистора, включенного в синтезированную цепочку.

Рис. 93. Температурная компенсация тензодиода в дифференциальной схеме с помощью полупроводникового диода.

Аналогично тензодиоду проводится термокомпенсация переключающих схем электроакустических преобразователей с тензочувствительными четырехслойными структурами. Для этого последовательно с четырехслойной структурой включают синтезированную цепочку с терморезистором с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Эта цепочка обеспечивает снижение потенциа-

ла в точке *A* с ростом температуры с целью исключения ложного срабатывания тензоструктуры (рис. 95).

При применении тензотиристора с управляющим электродом вышеописанная цепочка может быть включена в цепь управляющего электрода (рис. 96).

Рис. 94. Температурная компенсация тензодиода в мостовой схеме с помощью полупроводникового диода.

Представляет интерес рассмотрение вопросов влияния температуры на туннельные тензодиоды и осуществления термокомпенсации электроакустических преобразователей, выполненных на их основе. При этом температурная компенсация может быть осуществлена двумя путями: схемным и технологическим. Простейший схемный путь термокомпенсации мостового электроакустического преобразователя заключается во включении термокомпенсирующего элемента в смежное с рабочим элементом плечо. Воздействию температуры среды при этом подвергаются оба элемента. Для туннельных тензодиодов на основе германия и арсенида галлия пиковый ток имеет отрицательный температурный коэффициент, а ток на втором участке положительного сопротивления и в области минимума характеристики обладает положительным

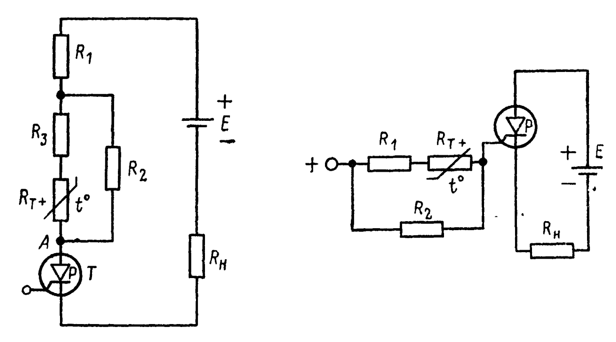


Рис. 95. Температурная компенсация тензотиристора с помощью синтезированной цепочки с монокристаллическим терморезистором.

Рис. 96. Температурная компенсация тензотиристора с помощью синтезированной цепочки с терморезистором с положительным температурным коэффициентом.

температурным коэффициентом. Это дает возможность использовать шунтированный туннельный тензодиод на горизонтальном участке вольт-амперной характеристики таким образом, чтобы влияние температуры было пренебрежимо малым. Для этого подаваемое на шунтированный тензодиод напряжение должно обеспечивать совпадение рабочей точки с точкой перемены знака температурного коэффициента.

Еще один способ исключения влияния температуры состоит в параллельном соединении двух туннельных тензодиодов с температурными коэффициентами противоположного знака, например кремниевого туннельного тензодиода, пиковый ток которого увеличивается с повышением температуры, и тензодиода из германия или арсенида галлия, пиковый ток которых с ростом температуры уменьшается. Графически такая термокомпенсация показана на рис. 97. Кривые *3* и *4* соответствуют характеристикам туннельных тензодиодов с разными знаками температурных коэффициентов, а кривая *2* — суммарной не зависящей от температуры вольт-амперной характеристике электрической цепи из двух параллельно включенных тензодиодов. Для более точной температурной компенсации

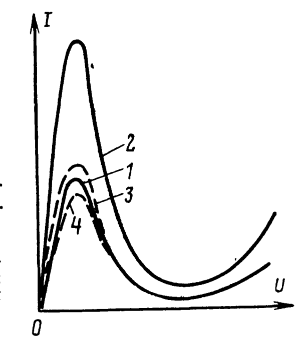


Рис. 97. Температурная компенсация путем параллельного включения двух туннельных диодов.

1 — исходная характеристика диодов; *2* — суммарная вольт-амперная характеристика; *3* и *4* — характеристики диодов при действии температуры.

необходимо, чтобы значения температурных коэффициентов тензодиодов были равны по абсолютной величине.

Температурную стабилизацию работы туннельных тензодиодов можно осуществить технологическим путем за счет использования полупроводниковых материалов с такой концентрацией примесей, при которой температурные эффекты в требуемом интервале температур сводятся к минимуму. Соответствующая концентрация примесей для германиевых туннельных тензодиодов определена экспериментально и составляет $3{,}7 \cdot 10^{19}$ атомов мышьяка в 1 $см^3$.

Так как пиковое напряжение туннельного тензодиода зависит от концентрации примесей и сопротивления используемого полупроводникового материала, по значению пикового напряжения можно предсказать знак температурного коэффициента туннельного тока. Малое значение пикового напряжения соответствует слабому легированию и, следовательно, отрицательному температурному коэффициенту. Наряду с изменением пикового напряжения с температурой меняется также пиковый ток.

Температурная стабилизация режима работы туннельных тензодиодов может быть также обеспечена, если их изготавливать из пластин *n*- и *p*-типов. Экспериментальные исследования на туннельных тензодиодах из арсенида галлия показали, что вольт-амперная характеристика для материала *n*-типа с повышением температуры смещается в сторону бóльших, а для материала *p*-типа — в сторону меньших токов. Используя этот эффект, можно получить независимое от температуры устройство путем параллельного соединения тензодиодов *p*- и *n*-типа. Возрастание давления вызывает уменьшение пикового тока для диодов обоих типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кандо Йодзо, Канадзава Ясутомо, Номура Масанори.** Электроакустический преобразователь. Пат. Япония, кл. 99(5)2, № 22105.

2. **Мураяма Нобору.** Звукосниматель. Пат. Япония, кл. 99(5), № 48—14877.

3. **Сыркин Л. Н., Феоктистова Н. Н.** Исследование пьезочувствительного транзистора.— В кн.: Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов. Л., «Наука», 1969, с. 272—283.

4. **Словарь** радиолюбителя. Под ред. Л. П. Крайзмера и С. Э. Хайкина. М.—Л., «Энергия», 1971, 713 с. с ил.

5. **Трухачев Б. С., Кривоносов И. И.** Тензопреобразовательное устройство. А. С. № 220582 (СССР). Опубл. в бюлл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1968, № 20, с. 89.

6. **Инокути Х., Акамату Х.** Электропроводность органических полупроводников. М., Изд-во иностр. лит., 1963. 66 с. с ил.

7. **Тензочувствительность** полупроводниковых полимеров и их техническое применение.— В кн.: Полупроводниковые полимеры с сопряженными связями. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1966, с. 151—155. Авт.: Я. М. Паушкин, И. И. Кривоносов, А. Ф. Лунин и др.

8. **Bulthuis K.** The effect of local pressure on silicon *p-n*-junctions. — «Philips Res. Reports», 1965, vol. 20, № 4, p. 415—431.

9. **Кривоносов И. И.** Тензодатчик. А. С. № 198770 (СССР). Опубл. в бюлл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1967, № 14, с. 126.

10. **Методы** и приборы ультразвуковых исследований.— В кн.: Физическая акустика. Часть Б. Под ред. У. Мэзона. М., «Мир», 1967, 362 с. с ил.

11. **Senitzky B.** Electrostatic field-effect transistor having insulated electrode controlling field in depletion region of reversebiased junction. Pat. USA. Cl. 317—235, № 2994811.

12. **Полупроводниковые** тензодатчики. Под ред. М. Дина. М.-Л, «Энергия», 1965. 216 с. с ил.

13. **Трухачев Б. С., Удалов Н. П.** Полупроводниковые тензопреобразователи. М., «Энергия», 1968. 80 с. с ил.

14. Bazin B. Pressure effect on silicon tunnel diode.— «Journal Physics and Chemistry Solids», 1965, vol. 26, № 12, p. 2075—2077.

15. **Кривоносов И. И.** Модель датчика давления. А. С. № 393625(СССР). Опубл. в бюлл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1973, № 33, с. 168.

16. **Кривоносов И. И., Пятницкая Т. И.** Некоторые вопросы термостабилизации резисторов с положительным температурным коэффициентом.—«Труды агрофизического научно-исследовательского института», 1972, вып. 33, с. 221—226.

17. **Кривоносов А. И., Маркова Н. А., Кривоносов И. И., Зайков Г. Е., Берлин А. А.** Датчик температуры. А. С. № 297874(СССР). Опубл. в бюлл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1971, № 10, с. 141.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ИГОРЬ ИВАНОВИЧ КРИВОНОСОВ

Полупроводниковые электроакустические преобразователи в радиосхемах

Редактор *В. П. Будянов*

Редактор издательства *А. Г. Козлова*

Обложка художника *А. А. Иванова*

Технический редактор *Н. Н. Левченко*

Корректор *Г. Г. Желтова*

ИБ № 541

Сдано в набор 10/VIII 1976 г. Подписано к печати 1/XI 1976 г. Т-20307. Формат 84×108 1/32. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 4,62. Уч-изд. л. 6,07. Тираж 40 000 экз. Зак. 674. Цена 24 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600610, г. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

Цена 24 коп.